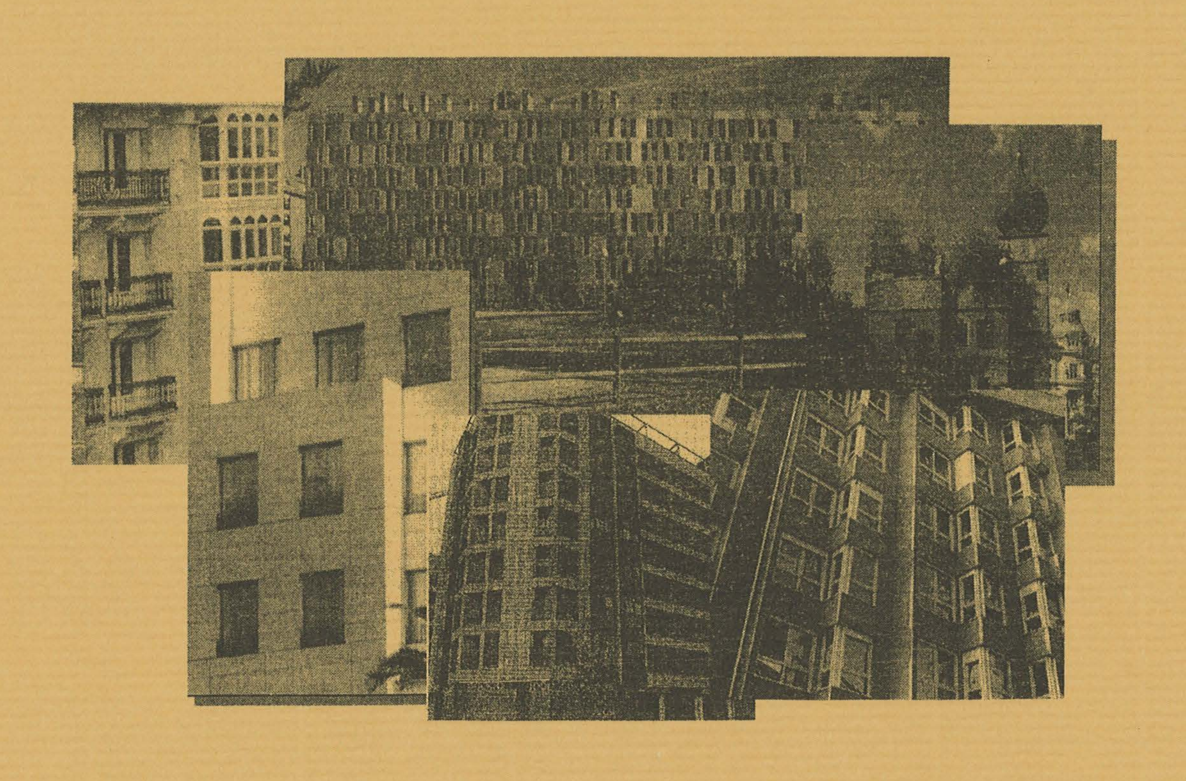
LAS FACHADAS Y SU PROTECCIÓN FRENTE AL RUIDO

por

CÉSAR DÍAZ SANCHIDRIÁN



CUADERNOS
DEL INSTITUTO
JUAN DE HERRERA
DE LA *ESCUELA DE*
ARQUITECTURA
DE MADRID

2-51-08

LAS FACHADAS Y SU PROTECCIÓN FRENTE AL RUIDO

por

CÉSAR DÍAZ SANCHIDRIÁN

CUADERNOS
DEL INSTITUTO
JUAN DE HERRERA
DE LA *ESCUELA DE*
ARQUITECTURA
DE MADRID

2-51-08

C U A D E R N O S
DEL INSTITUTO
JUAN DE HERRERA

NUMERACIÓN

2 Área

51 Autor

08 Ordinal de cuaderno (del autor)

0 VARIOS
1 ESTRUCTURAS
2 CONSTRUCCIÓN
3 FÍSICA Y MATEMÁTICAS
4 TEORÍA
5 GEOMETRÍA Y DIBUJO
6 PROYECTOS
7 URBANISMO
8 RESTAURACIÓN

Las fachadas y su protección frente al ruido

Instituto Juan de Herrera.
Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid.
Composición y maquetación: Daniel Álvarez Morcillo.
CUADERNO 233.01 / 2-51-08
ISBN-13: 978-84-9728-232-1
Depósito Legal: M-3596-2007

LAS FACHADAS Y SU PROTECCIÓN FRENTE AL RUIDO

ÍNDICE

1- INTRODUCCIÓN

Los edificios desde el punto de vista acústico tienen que cumplir unas condiciones acústicas mínimas exigibles, de acuerdo con su uso y la actividad que se desarrolle en su interior. El CTE en el artículo 14. Exigencias básicas de protección frente al ruido (HR) expresa:

El objetivo del requisito básico "Protección frente al ruido" consiste en limitar, dentro de los edificios y en condiciones normales de utilización, el riesgo de molestias o enfermedades que el ruido pueda producir a los usuarios, como consecuencia de las características de su proyecto, construcción, uso y mantenimiento.

Para satisfacer este objetivo, los edificios se proyectarán, construirán y mantendrán de tal forma que los elementos constructivos que conforman sus recintos tengan unas características acústicas adecuadas para reducir la transmisión del ruido aéreo, del ruido de impactos y del ruido y vibraciones de las instalaciones propias del edificio, y para limitar el ruido reverberante de los recintos.

El Documento Básico "DB HR Protección frente al ruido" especifica parámetros objetivos y sistemas de verificación cuyo cumplimiento asegura la satisfacción de las exigencias básicas y la superación de los niveles mínimos de calidad propios del requisito básico de protección frente al ruido.

Para satisfacer las exigencias del CTE en lo referente a la protección frente al ruido los elementos interiores de separación, así como las fachadas, las cubiertas, las medianerías y los suelos en contacto con el aire exterior que conforman cada recinto de un edificio deben tener, en conjunción con los elementos constructivos adyacentes, unas características tales que se alcancen unos valores mínimos de aislamiento acústico a ruido aéreo. Por otra parte, los elementos constructivos de separación horizontales deben tener, en conjunción con los elementos constructivos adyacentes, unas características tales que no superen unos valores máximos del nivel de presión de ruido de impactos (aislamiento acústico a ruido de impactos). Además, los recintos tales como aulas, salas de conferencias, comedores y restaurantes, deberán proyectarse de forma que tengan un tiempo de reverberación máximo, de acuerdo con su volumen. Las zonas comunes deberán tener una absorción acústica mínima de acuerdo con su volumen. En los recintos que contengan instalaciones se limitarán adecuadamente los niveles de ruido y vibraciones debidos a estas.

El cumplimiento de las exigencias citadas anteriormente se deberá tener en consideración en el planeamiento urbanístico y en los proyectos del edificio y de las instalaciones.

El aislamiento mínimo a ruido aéreo de la envolvente del edificio (fachadas, cubiertas y suelos en contacto con el aire exterior) dependerá del nivel de ruido exterior de la zona donde se ubica el edificio y del uso del edificio. Se debe garantizar que el nivel inmisión de ruido en el interior de los recintos del edificio,

sea el adecuado para que se desarrollen las actividades en los diferentes recintos sin riesgo, daño o molestia para las personas, ni interfieran en el desarrollo de sus actividades.

2. LAS FACHADAS

La fachada es la parte visible de un edificio que cumple diferentes funciones. Desde el punto de vista del proyecto presenta el aspecto compositivo, de adaptación al entorno y de expresividad del edificio. Los materiales elegidos, la relación entre partes ciegas y los huecos definen su aspecto exterior. Debe garantizar la protección térmica, acústica, de iluminación, de estanqueidad, resistencia al fuego y de estabilidad para alcanzar unas condiciones de habitabilidad. Para garantizar lo anterior las fachadas adoptan diferentes tipologías, desde cerramientos monocapa a multicapas.

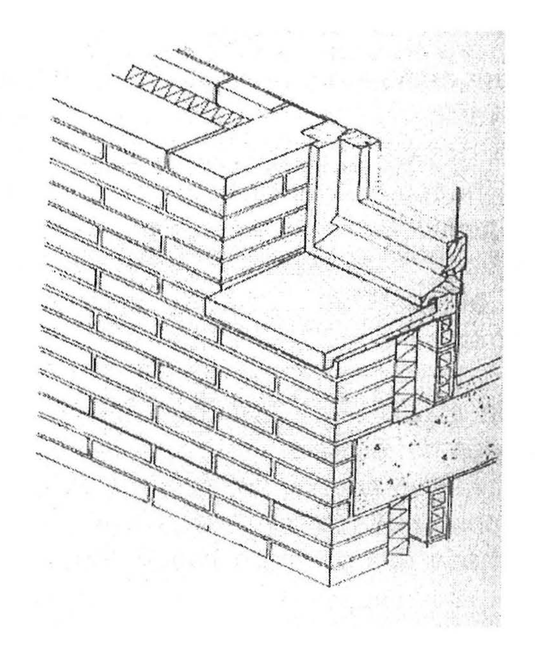
Según la terminología utilizada en el DB HR Protección frente al ruido, la fachada es el cerramiento perimétrico del edificio, vertical o con inclinación no mayor que 60° sobre la horizontal, que lo separa del exterior. Incluye tanto el muro de fachada como los huecos (puertas exteriores y ventanas). Este documento del CTE define la fachada ligera, como una fachada continua y anclada a una estructura auxiliar, cuya masa por unidad de superficie es menor que 100 kg/m^2.

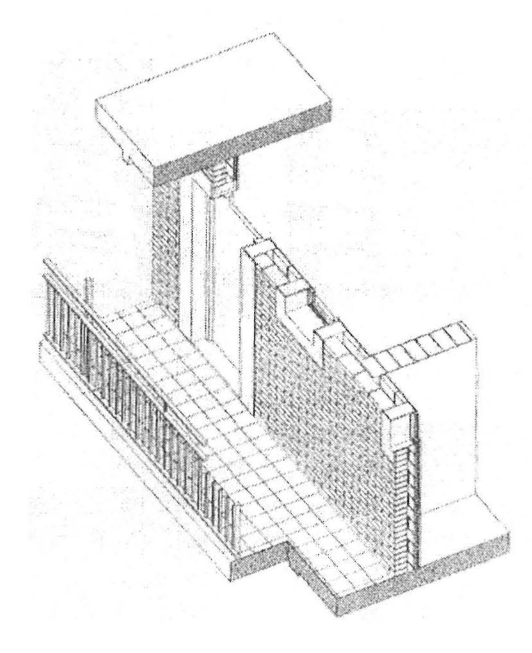
Las mayores exigencias de confort, durabilidad, sostenibilidad y ahorro energético en los edificios, han hecho aparecer nuevas tipologías de los cerramientos verticales o fachadas, que están unidas tanto al perfeccionamiento o mejora de los sistemas y materiales tradicionales, como a la aplicación de nuevas técnicas y componentes en la industria de la construcción.

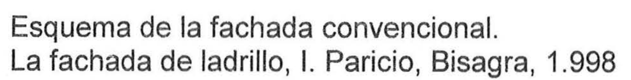
Existe una gran variedad de tipologías de fachadas, pero en España la mayoría de las fachadas en edificios residenciales son de ladrillos, insertadas en estructuras porticadas. La mayoría de las fachadas están formadas por dos hojas (fachada convencional). La hoja exterior es de medio pie de ladrillo cerámico perforado, visto o enfoscado, está apoyada de manera semivolada en los dos tercios del ancho de la hoja; la hoja interior es de ladrillo hueco y no tiene contacto con la hoja exterior. En la cámara entre ambas hojas se introduce un material aislante térmico.

En la actualidad, la fachada convencional en España evoluciona lentamente hacia nuevas tipologías como son las fachadas ventiladas y las fachadas prefabricadas. La fachada ventilada es un cerramiento compuesto por diversas hojas, la exterior es una hoja de relativo poco espesor, con juntas total o parcialmente abiertas y separada del resto por una cámara ventilada donde se sitúa el aislamiento térmico adosado al muro interior. Los puentes térmicos son mínimos. Esta tipología de fachada presenta un mejor comportamiento respecto que debe cumplir todo cerramiento exterior.

Como analizaremos en los apartados siguientes, desde la perspectiva del aislamiento acústico a ruido aéreo de las fachadas de los recintos, la transición de la fachada convencional a las fachadas ventiladas no afecta de forma importante al aislamiento global a ruido aéreo de las mismas, pues el tipo de cerramiento del hueco de fachada es la parte que más influye en el mismo.



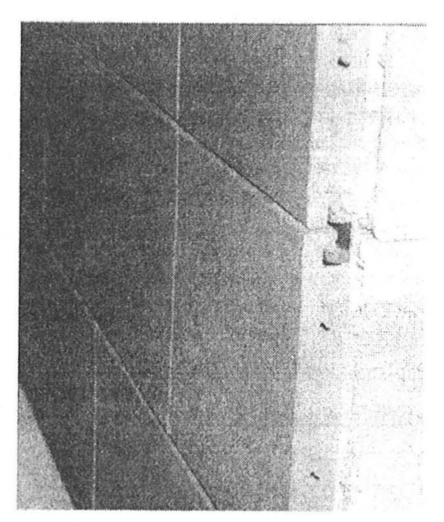




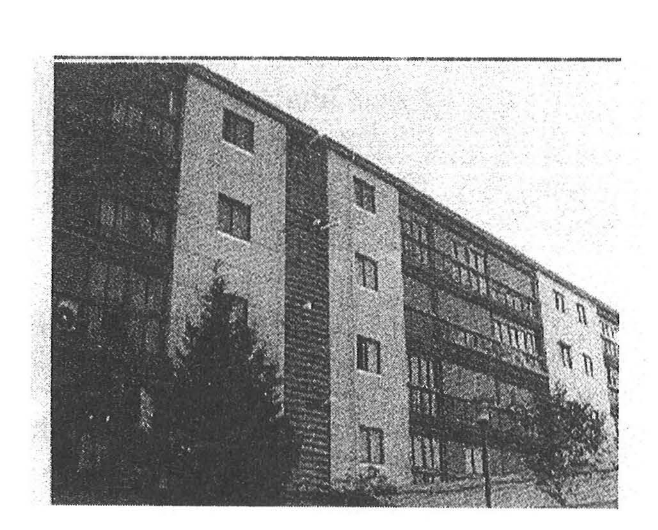
Esquema de la fachada convencional.
La fachada de ladrillo, I. Paricio, Bisagra, 1.998

Poblado de Absorción Fuencarrál B.
Alejandro de la Sota, 1954-1956

Figura1. Ejemplos de fachadas convencionales



La hoja exterior es un aplacado cerámico



Edificio rehabilitado. Hoja exterior tablero de resinas sintéticas

Figura 2: Ejemplos de fachadas ventiladas.

3 El AISLAMIENTO ACÚSTICO A RUIDO AÉREO Y SUS MAGNITUDES RELEVANTES

El aislamiento acústico tiene por objeto el proteger un ambiente acústico contra la penetración de sonidos no deseados, dificultando su propagación. El aislamiento acústico a ruido aéreo de un elemento constructivo o cerramiento que separa dos ambientes acústicos, se define como la capacidad de reducir la energía acústica que se propaga por vía aérea del ambiente acústico emisor al receptor.

Según el medio en el que se produce el ruido, este se clasifica en *ruido aéreo*, cuando se genera en el aire y *ruido estructural*, cuando se genera en un medio sólido. El *ruido de impacto* es un caso particular de ruido estructural.

La transmisión acústica desde el exterior a un recinto de un edificio, entre dos recintos, etc. se produce por diferentes caminos, los directos y los indirectos. *Las transmisiones directas* se realizan únicamente a través del elemento separador. Incluyen las transmisiones del sonido que incidiendo sobre el elemento separador es radiado por este al recinto receptor, y el ruido aéreo transmitido a través de huecos y rendijas en el mismo. Las transmisiones directas dependen básicamente del aislamiento acústico del elemento separador y de su superficie. *Las transmisiones indirectas*, se subdividen en *indirectas por vía sólida o transmisiones por flancos*, (paredes, techos, suelos) e *indirectas por vía aérea* (corredores, techos suspendidos, sistemas de ventilación, etc.). Las transmisiones indirectas dependen de la constitución de las paredes laterales y del tipo de ligazón con el elemento separador.

El sonido entre recintos contiguos se transmite de manera directa través de la pared separadora, camino Dd y por los caminos de flanco: Ff, Df, Fd. El aislamiento acústico a ruido aéreo entre los dos recintos dependerá de la energía acústica transmitida por cada uno de los caminos (1 Dd; 4Fd; 4Df; 4Ff).

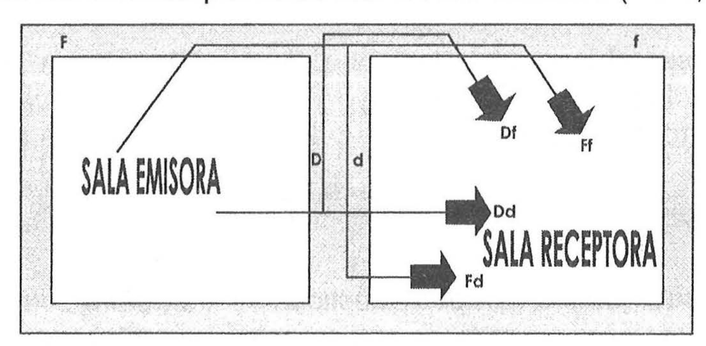


Figura 3: Caminos de transmisión acústica entre dos recintos.

En los edificios las transmisiones indirectas son importantes, y en algunos casos pueden ser predominantes. El aislamiento acústico entre dos recintos depende de las transmisiones del sonido por cada uno de los caminos de transmisión, su valor estará muy condicionado por el sistema constructivo de menor aislamiento acústico. La transmisión indirecta es tanto mayor cuanto más ligeros son los elementos constructivos adyacentes.

3.1.- MAGNITUDES QUE EXPRESAN EL AISLAMIENTO ACÚSTICO A RUIDO AÉREO.

Cuando las ondas sonoras inciden sobre un elemento constructivo, este vibra y transmite energía acústica de la misma frecuencia que el sonido incidente. La energía trasmitida por el elemento constructivo depende de la energía incidente y de las características del elemento. Dicho de otra forma, cuando las ondas sonoras inciden sobre el elemento constructivo con una energía E_i , parte de la energía es reflejada E_r , y el resto es absorbida E_a . La energía absorbida es en parte disipada en el elemento constructivo y el resto es transmitida.

$$E_i = E_r + E_a = E_r + E_d + E_t \qquad [1]$$

Se define el *coeficiente de transmisión sonora de un elemento constructivo* τ , en una frecuencia o banda de frecuencia, al cociente entre las potencia acústica transmitida a través del elemento y la potencia acústica incidente sobre el.

$$\tau(f,\theta) = \frac{W_{transmitida}}{W_{incidente}} \qquad [2]$$

El coeficiente de transmisión sonora es función de la frecuencia y del ángulo de incidencia θ, medido respecto a la normal a la superficie del elemento divisorio.

3.2 MAGNITUDES QUE EXPRESAN LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS

Las magnitudes que caracterizan las propiedades de aislamiento a ruido aéreo de un elemento constructivo se determinan en bandas de tercio de octava y de octava y se miden en laboratorio.

Índice de reducción acústica, R

Es diez veces el logaritmo decimal del cociente entre la potencia acústica W_1 incidente sobre la pared de ensayo y la potencia acústica transmitida a través de la muestra W_2. Esta magnitud se designa por R y se expresa en decibelios.

$$R = 10.\log\frac{1}{\tau} = 10.\lg\frac{W_1}{W_2} \quad dB \qquad [3]$$

Considerando que los campos acústicos en los dos recintos son perfectamente difusos y que el sonido radiado al local receptor se ha transmitido a través de la muestra, de acuerdo con la Norma UNE-EN-ISO 140-3: Medición en laboratorio del aislamiento acústico al ruido aéreo de los elementos de construcción, el índice de reducción sonora R se evalúa como

$$R = L_1 - L_2 + 10\lg\frac{S}{A} \quad dB \qquad [4]$$

donde: L_1 y L_2 son los niveles de presión acústica medios en los recintos emisor y receptor, expresados en dB; S, es el área de la muestra, en m^2; y A es el área de absorción acústica equivalente en el recinto receptor, en m^2.

El término de corrección de la ecuación anterior, se evalúa a partir del tiempo de reverberación medido de acuerdo con la Norma UNE EN ISO 354:2004 y se determina utilizando la fórmula de Sabine del tiempo de reverberación:

$$A = \frac{0{,}16V}{T} \quad m^2 \qquad [5]$$

donde: A, es el área de absorción acústica equivalente, en m^2; V es el volumen del recinto en m^3 y T es el tiempo de reverberación del recinto receptor en segundos.

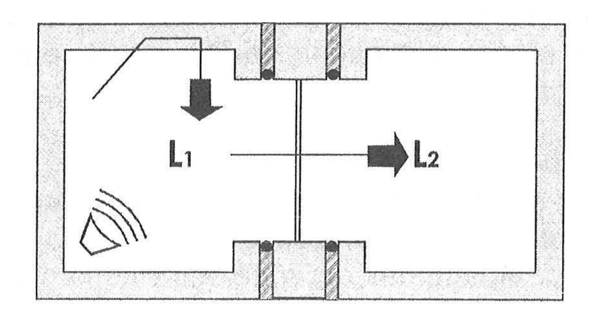


Figura 4: En los ensayos en laboratorio, el sonido se transmite del recinto emisor al receptor a través del sistema constructivo que los separa.

3.3 MAGNITUDES QUE EXPRESAN LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS RECINTOS.

De acuerdo con la Norma UNE-EN-ISO 140-4: Medición *in situ* del aislamiento al ruido aéreo entre locales, se define:

Diferencia de niveles, D

Es la diferencia, en decibelios, del promedio espacio-temporal de los niveles de presión acústica producidos en los dos recintos para una o varias fuentes de ruido situadas en ellos:

$$D = L_1 - L_2 \quad dB \qquad [6]$$

L_1 es el nivel de presión acústica medio en el recinto emisor; L_2, es el nivel de presión acústica medio en el recinto receptor. En general, si intercambiamos los recintos emisor y receptor D no es el mismo.

Diferencia de niveles normalizada, D_n

Es la diferencia de niveles, en decibelios, correspondiente a un área de absorción de referencia en el recinto receptor:

$$D_n = L_1 - L_2 - 10\log\frac{A}{A_0} \quad dB \qquad [7]$$

A es el área de absorción acústica equivalente del recinto receptor, en m^2; A_0, es el área de absorción acústica de referencia, en m^2, (para recintos en viviendas o recintos de tamaño comparable: $A_0 = 10\ m^2$).

Diferencia de niveles estandarizada, D_{nT}
Es la diferencia de niveles, en decibelios, correspondiente a un valor de referencia del tiempo de reverberación en el recinto receptor, se define mediante la expresión:

$$D_{nT} = L_1 - L_2 + 10\lg\frac{T}{T_0} \quad dB \qquad [8]$$

T es el tiempo de reverberación en el recinto receptor y T_0 es el tiempo de reverberación de referencia a todas las frecuencias; para viviendas, T_0 = 0,5 s.

La diferencia de niveles D; la diferencia de niveles normalizada D_n; y la diferencia de niveles estandarizada D_{nT}, en general, varían con la frecuencia del sonido.

Índice de reducción acústica aparente, R'
Es diez veces el logaritmo decimal del cociente entre la potencia acústica W_1 incidente sobre la pared de ensayo y la potencia acústica total transmitida al recinto receptor si, además de la potencia sonora W_2 transmitida a través del elemento separador, es significativa la potencia sonora W_3 transmitida a través de elementos laterales o de otros componentes; se expresa en decibelios:

$$R' = 10.\lg\frac{W_1}{W_2 + W_3} \quad dB \qquad [9]$$

Supuestos los campos acústicos difusos en los recintos emisor y receptor, el índice de reducción sonora aparente R´, se evalúa como

$$R' = L_1 + -L_2 + 10\lg\frac{S}{A} \quad dB \qquad [10]$$

donde: D es la diferencia de niveles; S es el área del elemento separador; y A es el área de absorción acústica equivalente en el recinto receptor.

En el índice de reducción sonora aparente, la potencia sonora transmitida al recinto receptor está relacionada con la potencia sonora incidente sobre elemento constructivo común, con independencia de las condiciones reales de transmisión.

Si los dos recintos tienen el mismo área de absorción acústica equivalente, el índice de reducción acústica aparente es independiente del sentido de la transmisión. Si las áreas de absorción acústica equivalentes son diferentes, el índice de reducción acústica aparente es diferente según quien sea el recinto emisor o receptor. La misma fuente sonora emitiendo con el mismo nivel de potencia acústica se percibe de forma diferente según se encuentre situada en uno u otro recinto.

Relación entre los diversos índices

Las diferencias de niveles normalizada y estandarizada están relacionadas con el índice de reducción sonora aparente. En consecuencia al conocer una de las magnitudes anteriores se pueden deducir las otras. Se relacionan de la siguiente manera:

$$D_n = R'+10.\lg\frac{A_0}{S} = R'+10.\lg\frac{10}{S} \quad dB \qquad [11]$$

$$D_{nT} = R'+10.\lg\frac{0{,}16V}{T_0 S} = R'+10.\lg\frac{0{,}32V}{S} \quad dB \qquad [12]$$

V es el volumen del recinto receptor, en m^3.

Diferencia de nivel normalizada de un elemento, $D_{n,e}$.

Es la diferencia de nivel de presión acústica, promediada espacial y temporalmente, producida entre dos recintos, con una fuente sonora activa en uno de ellos, y debiéndose la transmisión acústica únicamente a un elemento constructivo pequeño (por ejemplo dispositivos de ventilación, cajón de persiana, conductos para cableado eléctrico, etc). $D_{n,e}$ se normaliza a un área de absorción acústica equivalente de referencia en el recinto receptor A_0 = 10 m^2. Esta magnitud se determina en laboratorio según la Norma UNE EN 20140 –10.

$$D_{n,e} = L_1 - L_2 - 10\lg\frac{A}{A_0} \quad dB \qquad [13]$$

A es el área de absorción acústica equivalente en el recinto receptor, en m^2.

3.4.- MAGNITUDES QUE EXPRESAN EL AISLAMIENTO ACÚSTICO A RUIDO AÉREO DE LAS FACHADAS

En las mediciones in situ del aislamiento global a ruido aéreo de fachadas se obtiene el índice de reducción acústica de una fachada en relación a una posición 2 m frente a la fachada. Los métodos globales, pretenden valorar la diferencia de nivel sonoro exterior/interior en las condiciones de tráfico existentes. Los métodos globales más precisos usan el ruido de tráfico como fuente de ruido. Adicionalmente se puede usar un altavoz como fuente sonora artificial. Según la Norma EN ISO 140-5: Mediciones in situ del aislamiento acústico a ruido aéreo de elementos de fachada y de fachadas, se utilizan las magnitudes siguientes:

Diferencia de niveles, D_{2m}

Es la diferencia, en decibelios, entre el nivel de presión sonora exterior a 2 m frente a la fachada, $L_{1,2m}$ y el valor medio espacio-temporal del nivel de presión sonora L_2, en el interior del local receptor:

$$D_{2m} = L_{1,2m} - L_2 \quad dB \qquad [14]$$

Diferencia de niveles normalizada, $D_{2m,n}$

Es la diferencia de niveles, en decibelios, correspondiente a un área de absorción de referencia en el recinto receptor:

$$D_{2m,n} = L_{1,2m} - L_2 - 10\log\frac{A}{A_0} \quad dB \qquad [15]$$

A es el área de absorción acústica equivalente del recinto receptor, en m^2; A_0, = 10 m^2 es el área de absorción acústica equivalente de referencia.

Diferencia de niveles estandarizada, $D_{2m,nT}$

Es la diferencia de niveles, en decibelios, correspondiente a un valor de referencia del tiempo de reverberación en el recinto receptor, se define mediante la expresión:

$$D_{2m,nT} = L_{1,2m} - L_2 + 10 \lg \frac{T}{T_0} \quad dB \qquad [16]$$

D_{2m} es la diferencia de niveles; T es el tiempo de reverberación en el recinto receptor y T_0 es el tiempo de reverberación de referencia; T_0 = 0,5 s.

Nota: Según el tipo de fuente del ruido (tráfico, trenes, aeronaves o altavoces) en la notación se antepone un subíndice. Por ejemplo para ruido de tráfico $D_{tr,2m,nT}$,, si se usa un altavoz será $D_{ls,2m,nT}$. La notación es semejante para las otras magnitudes. En la práctica $D_{tr,2m,nT} \approx D_{ls,2m,nT}$. DB.

MÉTODO	RESULTADO	CAMPO DE APLICACIÓN
Global con ruido de tráfico	$D_{tr, 2m, nT}$ $D_{tr,2m,n}$	Método preferido para valorar el índice de reducción sonora de una fachada expuesta al ruido de tráfico.
Global con ruido de trenes	$D_{rt, 2m, nT}$ $D_{rt, 2m,n}$	Método preferido para valorar el índice de reducción sonora de una fachada expuesta al ruido de trenes.
Global con ruido de aeronaves	$D_{at,2m,nT}$ $D_{at,2m,n}$	Método preferido para valorar el índice de reducción sonora de una fachada expuesta al ruido de aeronaves.
Global con altavoz	$D_{ls, 2m,nT}$ $D_{ls, 2m,n}$	Método alternativo a los tres anteriores.

Tabla 1: Métodos de medición global del aislamiento a ruido aéreo de fachadas.

3.5.- INDICES GLOBALES DE VALORACIÓN DEL AISLAMIENTO ACÚSTICO A RUIDO AÉREO.

Al ser el aislamiento acústico de un elemento constructivo función de la frecuencia, hay que suministrar un gran número de datos. En acústica de los edificios las frecuencias de interés están entre 100 y 5000 Hz. En España, los datos del aislamiento acústico se realizan en 18 bandas de 1/3 de octava. Para simplificar el proceso de cálculo se han realizado estudios con fuentes de ruidos típicas en viviendas para obtener índices de valoración globales de una cifra, que especifican de forma efectiva las características de aislamiento acústico en laboratorio de los sistemas constructivos o in situ del aislamiento acústico entre recintos. De ésta forma se simplifica el establecimiento de valores exigenciales en las normativas. Estos índices globales tienen en cuenta las características físicas del ruido y aspectos perceptivos, básicamente de la molestia que producen. Se utilizan en el estudio del aislamiento acústico de ruido aéreo y de ruido de impactos.

Los métodos más utilizados en los países de nuestro entorno, para incluir un índice global de valoración del aislamiento acústico a ruido aéreo son los siguientes:

- 1) Los índices globales ponderados A, se utilizan habitualmente en Francia y España. El rango de frecuencias de interés está entre 100 Hz y 5 kHz. Los resultados se expresan en decibelios ponderados A, dBA. Se suelen representar R_A, D_{nTA}, etc.

2) Los índices ponderados que se basan en la comparación de una curva de aislamiento obtenida con curva tipo, siguiendo un determinado procedimiento según la Norma UNE-EN ISO 717-1. Evaluación del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 1: Aislamiento al ruido aéreo. Son los más difundidos. El rango de frecuencias para su cálculo es entre 100 Hz y 3150 Hz. El resultado es un número entero y se expresa en dB. El procedimiento para la evaluación de magnitudes globales es el mismo para todas ellas.

El índice global ponderado de aislamiento acústico es el valor en dB, a 500 Hz de la curva de referencia una vez ajustada a los valores experimentales según el método especificado en la Norma UNE-EN ISO 717- 1. Existen magnitudes globales de las propiedades globales de aislamiento al ruido aéreo de elementos de construcción, como por ejemplo el índice ponderado de reducción sonora R_w y magnitudes globales del aislamiento al ruido aéreo en edificios tales como: índice ponderado de reducción sonora aparente R'_w ; Diferencia de nivel estandarizada ponderada $D_{nT,w}$; Diferencia de nivel normalizada ponderada $D_{n,w}$, etc.

El índice global del aislamiento acústico de un elemento de construcción o entre recintos depende del espectro acústico de la fuente de ruido emisora. En consecuencia se añade al índice global ponderado un término de adaptación al espectro.

Término de adaptación al espectro: Es el valor, en dB, que ha de añadirse al valor de la magnitud global para tener en cuenta las características de un espectro de ruido particular.
Por ejemplo, es habitual utilizar para caracterizar el comportamiento acústico de un elemento constructivo en laboratorio el índice global R_w (C; C_{tr}), donde

- R_w es el índice ponderado de reducción sonora, en dB.
- C, Término de corrección para ruido rosa ponderado A. Se utiliza en el caso de fuentes de ruido con pocas bajas frecuencias, por ejemplo: actividades humanas (conversación, música, radio, televisión, juegos de niños), trenes a velocidades medias y altas, autopistas a velocidades mayores de 80 km/h, aviones a reacción a distancias cortas, factorías que emiten ruido de frecuencias medias y altas.
- C_{tr}, Termino de corrección para ruido de tráfico urbano ponderado A, se utiliza en el caso de fuentes de ruido con predominio de bajas

frecuencias, por ejemplo: Tráfico urbano, trenes a velocidades bajas, aviones a propulsión, aviones a reacción a grandes distancias, música de discotecas, factorías que emiten ruido en frecuencias bajas y medias.

Cuanto más elevados sean R_w, R_w + C, R_w + C_{tr}, mayor será el aislamiento acústico a ruido aéreo del elemento constructivo. Por ejemplo: R_W (C, C_{tr}) = 48 (-4, -8) dB, significa que el índice ponderado de reducción sonora R_w es 48 dB, que con ruido rosa ponderado A se reduce en 4 dB, y con tráfico se reduce en 8 dB.

Nota: Cuando se utiliza la Norma UNE-EN ISO 717-1 el rango de frecuencias utilizado en tercios de octava es entre 100 a 3150 Hz. Se puede utilizar un rango de frecuencias ampliado, que tiene que indicarse en los índices C y C_{tr}. Por ejemplo en el DB HR Protección frente al ruido del Código Técnico de la Edificación en España, el rango de frecuencias varía de 100 a 5000 Hz. En este caso:

$R_A = R_w + C_{100\text{-}5000}$; $D_{2m,nT,Atr} = D_{2m,nT,w} + C_{tr,100\text{-}5000}$

En el anexo A se explicará la forma de obtener estos índices globales.

4.- EL AISLAMIENTO ACÚSTICO A RUIDO AÉREO DE LOS ELEMENTOS MIXTOS.

Es habitual que las fachadas, particiones de los recintos, etc. estén compuestas por elementos constructivos diferentes. Cada uno de los elementos está caracterizado por un índice de reducción acústica. Por ejemplo fachadas con ventanas y/o balcones, paredes con puertas, cubiertas con claraboyas, etc. Las paredes o cerramientos suelen tener aberturas, aparte de ventanas y puertas, tales como orificios de ventilación, paso de canalizaciones, grietas, etc.

Para obtener una expresión del índice de reducción acústica de un elemento mixto, consideramos una pared de área S m^2, constituida por un elemento de área S_1 m^2 e índice de reducción acústica R_1, dB y otro elemento de área S_2 m^2 e índice de reducción acústica R_2, dB. El aislamiento mixto de la pared dependerá de las diferencias entre R_1 y R_2 , de las relaciones entre las áreas parciales S_1 y S_2 y el área total S.

Cuando en el recinto emisor la energía acústica es la misma y la transmisión es directa, la pared que separa los recintos emisor y receptor transmite energía acústica proporcionalmente a su área. En nuestro caso, el coeficiente de transmisión resultante es:

$$\tau_m(S_1 + S_2) = \tau_1 S_1 + \tau_2 S_2 \qquad [17]$$

$$\tau_m = \frac{S_1}{S}\tau_1 + \frac{S_2}{S}\tau_2 \qquad [18]$$

De la definición del índice de reducción acústica se puede deducir el coeficiente de transmisión de cada elemento

$$R_i = 10\lg\frac{1}{\tau_i} \quad dB$$

$$\tau_i = 10^{-0,1R_i}$$

El índice de reducción acústica mixto la pared es

$$R_m = 10\lg\frac{1}{\tau_m} = -10\lg(\frac{S_1}{S}.10^{-0,1R_1} + \frac{S_2}{S}.10^{-0,1R_2}) \quad dB \qquad [19]$$

En general el índice de reducción acústica mixto de una partición de n elementos diferentes, puede estimarse a partir de la siguiente expresión:

$$R_m = -10.\lg\left(\frac{\sum_{i=1}^{n} S_i.10^{-0,1R_i}}{\sum_{i=1}^{n} S_i}\right) \quad dB \qquad [20]$$

S_i es el área del elemento constructivo i, en m^2, y R_i es el índice de reducción acústica del elemento constructivo de área S_i,, en dB. Esta expresión se puede utilizar tanto en bandas de frecuencia, como para índices globales.

El índice de reducción acústica de un sistema constructivo mixto está condicionado por el índice de reducción acústica del elemento constructivo más débil. De aquí la gran importancia de lograr soluciones constructivas equilibradas y el evitar aberturas y grietas en los cerramientos. Cuando hay que mejorar el índice de reducción acústica de un sistema constructivo mixto hay que comenzar por mejorar el índice de reducción acústica del elemento constructivo más debil.

Se deja como ejercicio para el lector, el probar que cuando el sistema constructivo mixto consta únicamente de dos elementos de índice de reducción acústica diferentes, la expresión del índice de reduccíon acústico mixto se puede escribir:

$$R_m = R_2 - 10.\lg\left((1-\frac{S_2}{S}).10^{-0,1(R_1-R_2)} + \frac{S_2}{S}\right) \quad dB \qquad [21]$$

R_m, es el índice de reducción acústica del elemento constructivo mixto, R_1 el índice de reducción acústica del elemento constructivo de mayor aislamiento acústico, generalmente la parte ciega de la fachada, R_2 el índice de reducción acústica del elemento constructivo de menor aislamiento acústico, generalmente ventanas, puertas, lucernarios, etc; los tres índices en dB; S el área total del elemento constructivo mixto, S_2,, el área del elemento de menor aislamiento acústico, las dos áreas en m^2. El índice de reducción acústica del elemento constructivo mixto es como máximo 10 dB mayor que el elemento constructivo de menor índice de reducción acústica.

EJEMPLO 1

La fachada de un recinto está orientada a una calle con ruido de tráfico. La fachada está formada por una parte ciega de área 8 m^2 e índice ponderado de reducción acústica $R_w(C, C_{tr}) = 47(0; -4)$ dB, y una ventana de clase 3, sin cajón de persiana, de área 2 m^2 e índice ponderado de reducción acústica $R_w(C, C_{tr}) = 29(-1; -4)$ dB. Hállese el índice ponderado de reducción acústica de la fachada. En la misma fachada se duplica el área de la ventana, ¿cuál es el nuevo índice ponderado de reducción acústica?

SOLUCIÓN

Al ser la fuente de ruido exterior el tráfico rodado consideramos como índices ponderados de reducción acústica de los elementos de la fachada:

Parte ciega: $R_c = R_w + C_{tr} = 43$ dB y para la ventana $R_v = R_w + C_{tr} = 25$ dB

$$R_{m,w} + C_{tr} = -10.\lg\left[(\frac{S_v}{S_f}).10^{-0,1R_v} + (\frac{S_c}{S_f}).10^{-0,1R_c}\right] \quad dB$$

$$R_{m,w} + C_{tr} = -10.\lg\left[(\frac{8}{10}).10^{-4,3} + (\frac{2}{10}).10^{-2,5}\right] \quad = 31,7\ dB \cong 32\ dB$$

Si se duplica el área de la ventana

$$R_{m,w} + C_{tr} = -10.\lg\left[(\frac{6}{10}).10^{-4,3} + (\frac{4}{10}).10^{-2,5}\right] \quad = 28,9\ dB \cong 29\ dB$$

Al doblar el área de la superficie acristalada, el índice ponderado de reducción acústica de la fachada se reduce en 3 dB.

Cuando en la fachada de un recinto el área acristalada es un porcentaje elevado del área de la fachada, el índice de aislamiento acústico de la fachada, depende básicamente del índice de reducción acústica del cerramiento del hueco.

5 - EL AISLAMIENTO A RUIDO AÉREO DE LAS FACHADAS

Las fachadas de los recintos, junto con sus elementos constructivos adyacentes, deben tener un aislamiento acústico a ruido aéreo mínimo según el uso del recinto y los niveles sonoros en la zona donde está ubicado el edificio. Los niveles sonoros que inciden sobre la fachada del recinto dependerán de las fuentes de ruido, generalmente el tráfico rodado, tipos de vías y su distancia al edificio, altura del mismo, naturaleza continua o discreta de la trama urbana, exposición directa o indirecta de la fachada, etc.

Cada una de las cuatro caras que, como mínimo, tiene un edificio debería tratarse por separado, ya que cada una de ellas suele estar expuesta a niveles sonoros diferentes. En la práctica se elige como nivel sonoro para las fachadas de los recintos del edificio, el nivel sonoro incidente más elevado. El arquitecto ha de tener esto en cuenta desde el momento del proyecto. Lo habitual en la legislación acústica de los países de nuestro entorno es definir varios tipos de exposición sonora en los edificios, según los niveles sonoros continuos

equivalentes, medidos a 2 m delante de la fachada en el intervalo horario de día.

A efectos del aislamiento acústico a ruido aéreo frente al exterior de un recinto, se entiende por fachada el conjunto del cerramiento del edificio visto desde el propio recinto, partes ciegas, acristaladas practicables o no incluidas y la parte de la cubierta que no sea la correspondiente a la última planta. En los apartados siguientes se estudiará el aislamiento acústico a ruido aéreo de cada una de las componentes de la fachada, parte ciega y cerramiento del hueco de fachada (ventanas, vidrios, carpinterias, persianas y cajón de persianas, sellados, etc).

El DB HR Protección frente al ruido establece unos valores del aislamiento acústico a ruido aéreo $D_{2m,nT,Atr}$ entre un recinto protegido y el exterior, en función del uso del edificio y del nivel sonoro continuo equivalente día L_d de la zona donde se ubique el edificio. Define la Diferencia de niveles estandarizada, ponderada A, en fachadas, en cubiertas y en suelos en contacto con el aire exterior para ruido de automóviles, $D_{2m,nT,Atr}$ como la valoración global, en dBA, de la diferencia de niveles estandarizada de una fachada, de una cubierta o un suelo en contacto con el aire exterior, $D_{2m,nT}$, para un ruido exterior de automóviles. La define mediante la expresión:

$$D_{2m,nT,Atr} = -10.\lg\sum_{i=1}^{n} 10^{(L_{Atr,i} - D_{2m,nT,i})/10} \quad [dBA] \qquad [22];$$

siendo

$D_{2m,nT,i}$ la diferencia de niveles estandarizada, en la banda de frecuencia i, [dB]; $L_{Atr,i}$ el valor del espectro normalizado del ruido de automóviles, ponderado A, en la banda de frecuencia i, en dBA; i recorre todas las bandas de frecuencia de tercio de octava de 100 Hz a 5kHz.

En caso de ruido predominante de aeronaves también se utilizará este índice para la valoración global, pero usando los valores del espectro normalizado de ruido de aeronaves, ponderado A. En el anexo A se explicará el manejo de estas expresiones de acuerdo con el DB HR Protección frente el ruido.

La Norma UNE-EN 12354-3. (Enero 2001). Acústica de la edificación. Estimación de las características acústicas de las edificaciones a partir de las características de sus elementos. Parte 3: Aislamiento acústico a ruido aéreo contra ruido del exterior, especifica un modelo de cálculo para estimar el aislamiento acústico o la diferencia de nivel de presión acústica de una fachada o de cualquier otra superficie externa de un edificio. El cálculo se basa en el índice de reducción acústica de los distintos elementos que componen la fachada e incluye tanto transmisiones directas como indirectas. De los cálculos se obtienen resultados que se corresponden aproximadamente con los resultados de las mediciones in situ según la norma EN ISO 140-5. Los cálculos se pueden realizar por bandas de frecuencia o por índices globales.

6.- ESTIMACIÓN DE LOS NIVELES SONOROS EN EL INTERIOR DE UN RECINTO ORIGINADOS POR EL RUIDO EXTERIOR

El nivel acústico en el interior del recinto puede estimarse a partir del nivel de presión acústica en el exterior medido o calculado y de la diferencia de nivel acústico de la fachada.

Como la diferencia de nivel se refiere a una posición situada a 2 m de la fachada, según la Norma EN ISO 140-5, el nivel de presión acústica en el exterior debe ser el nivel en esa posición. Si el nivel de presión acústica en el exterior está dado en otra posición o situación, debería deducirse el nivel a 2 m a partir de él. Podría deducirse, por ejemplo, a partir del nivel de presión acústica (sin el edificio) teniendo en cuenta la reflexión en la fachada; para una fachada plana esto se traduce en un aumento del nivel de 3 dB en todas las bandas de frecuencia.

El nivel acústico en el interior, normalizado a una absorción de 10 m^2 es:

$$L_{2,n} = L_{1,2m} - D_{2m,n} \quad dB \qquad [23]$$

$L_{2,n}$ es el nivel de presión acústica medio en el recinto receptor, normalizado a una absorción acústica de 10 m^2;
$L_{1,2m}$ es el nivel de presión acústica en el exterior a 2 m de la fachada, según la EN ISO 140-5; $D_{2m,n}$ es la diferencia de nivel normalizada.

El nivel de presión acústica en el interior normalizado a un tiempo de reverberación de 0,5 s es:

$$L_{2,nT} = L_{1,2m} - D_{2m,nT} \qquad dB \qquad [24]$$

$L_{2,nT}$ es el nivel de presión acústica medio en el recinto receptor, estandarizado a un tiempo de reverberación de 0,5 s;
$D_{2m,nT}$ es la diferencia de nivel estandarizada.

En función del índice de reducción acústica aparente se puede escribir

$$L_{2,nT} = L_{1,2m} - R' - 10.\lg\frac{0,16V}{T_0 S} = L_{1,2m} - R' - 10.\lg\frac{0,32V}{S} \quad dB, T_0 = 0,5s \qquad [25]$$

En situaciones en que la fachada no sea plana, como ventanas con grandes vanos o aberturas, una habitación que hace esquina o una habitación bajo tejado, la diferencia de nivel de presión acústica relevante debería incluir la transmisión acústica a través de todas las partes de la fachada en correspondencia a una posición de referencia, según la siguiente interpretación: si la fachada no es plana, se tomará como área la suma de todas las partes de la misma, tal y como se ven desde dentro, siempre que el sonido incidente sobre todas ellas sea el mismo. Si esto no se cumple, cada parte de la fachada con un sonido incidente homogéneo debe tratarse de forma separada. Si las diferentes partes de la fachada total pueden tener diferentes niveles acústicos, como ventanas con grandes vanos, una habitación que hace

esquina o una habitación bajo el tejado, es posible considerar estas partes separadamente o combinadas como la envolvente total del recinto receptor, dependiendo de los requisitos y de la situación de medición prescrita (tipo de fuente, posición de la fuente, posición del micrófono exterior). En el último caso los resultados de los cálculos para cada parte deben combinarse teniendo en cuenta los niveles acústicos en el exterior de cada parte, relativos a una posición (de micrófono) de referencia definidas para mediciones in situ.

EJEMPLO 2

En una calle de una ciudad los niveles sonoros durante el intervalo horario de día, a 2 metros de la fachada de un edificio son $L_{1,2m}$ dB. Se ha medido la diferencia de niveles estandarizada de la fachada de un dormitorio $D_{ls,2m,nT}$ en un edificio situado en esa calle. Calcúlense los niveles de presión acústica medio global en el dormitorio L_2 en dB y en dB ponderados A.

Frecuencia central, Hz	125	250	500	1k	2k	4 k
$L_{1,2m}$, dB	72	69	65	64	60	55
$D_{ls,2m,nT}$, dB	24,2	21,6	22,0	22,4	30,9	32,3

SOLUCIÓN

El nivel de presión acústica en el interior normalizado a un tiempo de reverberación de 0,5 s es:

$$L_{2,nT} = L_{1,2m} - D_{2m,nT} \qquad \text{dB}$$

Frecuencia central, Hz	125	250	500	1k	2k	4 k
$L_{1,2m}$, dB	72	69	65	64	60	55
$D_{ls,2m,nT}$, dB	24,2	21,6	22,0	22,4	30,9	32,3
$L_{2,\,nT}$, dB	47,8	47,4	43	41,6	29,1	22,7
Corrección A, dB	-16,1	-8,6	-3,2	0	+1,2	+1
$L_{2,\,nTA}$, dB	31,7	38,8	39,8	41,6	30,3	23,7
Nivel global de inmisión: $L_{2,nT} = 10.\lg(10^{4,78}+..+10^{2,27}) = 51,7$ dB, Nivel global de inmisión en dBA: $L_{2,nTA} = 10.\lg(10^{3,17}+..+10^{2,37}) = 45,3$ dBA						

7.- MÉTODO DE CÁLCULO DEL AISLAMIENTO ACÚSTICO A RUIDO AÉREO EN FACHADAS DE RECINTOS.

La fachada en general consta de diferentes sistemas constructivos y la transmisión acústica a su través es debida a la transmisión acústica de cada uno de sus componentes. En los cálculos se suele considerar que la transmisión acústica de cada elemento constructivo es independiente de las demás.

La diferencia de nivel normalizada de la fachada de un recinto depende de su índice de reducción acústica aparente vista desde el interior R´, la influencia de la forma de la fachada y las dimensiones del recinto.

$$D_{2m,nT} = R' + \Delta L_{fs} + 10\lg\frac{V}{6T_0S} = R' + \Delta L_{fs} + 10\lg\frac{V}{S} - 5 \quad dB \qquad [26]$$

ΔL_{fs} es la diferencia de nivel por la forma de la fachada, en dB; V, el volumen del recinto receptor en m^3; S él área total de la fachada, vista desde el interior del recinto, en m^2 y T_0 el tiempo de reverberación de referencia; para viviendas es T_0 = 0,5 s.

La expresión exterior puede utilizarse para determinar las propiedades de aislamiento a ruido aéreo de la fachada en bandas de frecuencia, basándose en los índices de aislamiento acústico de los elementos de construcción en bandas de frecuencia. También puede ser utilizada con los valores globales. Por ejemplo, cuando predominan el ruido de automóviles o el ruido de aeronaves, la magnitud del aislamiento global es $D_{2m,nT,Atr.}$ =. $D_{2m,nT,w}$+ $C_{tr\ 100\text{-}5000}$. La ecuación [26] nos muestra la influencia del volumen del recinto receptor y del área de la fachada. Por ejemplo, si duplicamos el área de la fachada, o el volumen del recinto se disminuye a la mitad, el índice de reducción acústica global aparente de la fachada tiene que aumentar en 3 dB.

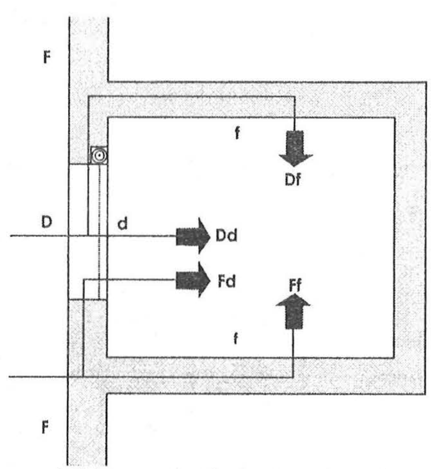


Figura 5. Vías de transmisión acústica desde el exterior al interior de un recinto.

El índice de reducción acústica aparente, R´, se obtiene considerando las transmisiones directas e indirectas. En la figura 5 se muestran los caminos de transmisión acústica desde el exterior al interior de un recinto.

La transmisión por flancos comprende todos los caminos indirectos, incluidos los correspondientes a elementos de fachada que no pertenecen al recinto.

$$R' = -10.\lg\left(10^{-0,1R_m} + \sum_{F=f=1}^{n}10^{-0,1R_{Ff}} + \sum_{f=1}^{n}{}^{-0,1R_{Df}} + \sum_{F=1}^{n}10^{-0,1R_{Fd}} + \frac{A_0}{S}\sum_{e_i,Si}10^{-0,1D_{n,e_ii}}\right) \quad dB \qquad [27]$$

R_m es el índice global de reducción acústica del elemento mixto [20], en dB. n, es el número de caminos indirectos, A_0 = 10 m^2. Para tomas de aire o respiraderos sin tratamiento acústico se considera:

$$D_{n,e} = -10.\lg\left(\frac{S_0}{10}\right) \quad dB \qquad [28]$$

donde S_0 es el área del respiradero, en m^2.

Las transmisiones indirectas respecto al aislamiento a ruido aéreo de las fachadas son pequeñas. Sin embargo cuando los elementos rígidos de la fachada están conectados a elementos rígidos del recinto hay que incluirlas en los cálculos, en especial cuando las exigencias de aislamiento a ruido aéreo de las fachadas sean elevadas. En las situaciones habituales estas transmisiones pueden estimarse en - 2 dB. Para estas situaciones habituales y sin tomas de aire la expresión [26] puede escribirse

$$R' = -10.\lg\left(10^{-0,1R_m}\right) - 2 \quad dB \qquad [29]$$

En el caso de utilizar valores globales, como son los del DB HR Protección frente al ruido de la legislación española, la ecuación [26] se puede escribir para obtener la Diferencia de niveles estandarizada, ponderada A en fachadas, para ruido de tráfico

$$D_{2m,nTAtr} = R'_{Atr} + \Delta L_{fs} + 10\lg\frac{V}{6T_0 S} = R'_{Atr} + \Delta L_{fs} + 10\lg\frac{V}{S} - 5 \qquad dBA \qquad [30]$$

8.- EL EFECTO DE LA FORMA DE LA FACHADA EN SU AISLAMIENTO A RUIDO AÉREO.

El efecto de la forma de la fachada de un recinto puede disminuir o aumentar la trasmisión acústica. Las correcciones por la forma de la fachada ΔL_{fs} pueden variar de –1 a + 7 dB. Los efectos positivos los producen los tratamientos absorbentes de los sofitos, existencia de balcones antepechados, etc. y los negativos a las reflexiones del sonido en sofitos sin absorción acústica. Las galerias casi cerradas, con respiraderos en su parte superior con altura de la línea de mira mayores de 2,5 m y tratamiento de elevada absoción acústica en el techo originan mejoras de aproximadamente +6 dB. El anexo C de la Norma UNE – EN 12354-3 Influencia de la forma de la fachada muestra ejemplos de la diferencia de niveles sonoros debido a la forma de la fachada ΔL_{fs}. La figura 6 muestra los parámetros más influyentes en la diferencia de niveles sonoros debido a la forma de la fachada: absorción acústica del sofito, altura de la línea de mira, plano de la fachada y fuente acústica.

La forma de la fachada se indica mediante una sección vertical de la galería balconada o terraza, Tabla 2. Si estas pueden cerrarse, es decir si no hay una abertura importante, esto se reflejará en la sección transversal, en caso contrario no. La absorción se indica mediante un coeficiente ponderado de absorción global α_w según la norma EN ISO 11654 como ≤ 0,,3; 0,6 ó ≥ 0,9. El efecto para valores intermedios se puede deducir por interpolación; α_w≥ 0,9 se aplica también si no hay ninguna superficie reflectante sobre la fachada considerada. La dirección del sonido incidente se caracteriza por la altura de la línea de mira desde la fuente hasta el plano de la fachada; la posición de la fuente que es relevante es la que se traduce en una menor altura

En la figura 7 se muestran para algunos casos la dependencia con la frecuencia, en bandas de octava, de la diferencia de nivel debida a la forma de las fachadas con relieve. En la figura, baja significa que la línea de mira es inferior a 1,5 m y alta, que la línea de mira es mayor de 2,5 m.

ΔL_{fs} dB	1 plano de fachada			2 galería			3 galería			4 galería			5 galería		
absorción del tejado (α_w) ⇒	no se aplica			≤0,3	0,6	≥0,9	≤0,3	0,6	≥0,9	≤0,3	0,6	≥0,9	≤0,3	0,6	≥0,9
línea de mira sobre la fachada: <1,5 m	0			-1	-1	0	-1	-1	0	0	0	1	no se aplica		
(1,5-2,5) m	0			no se aplica			-1	0	2	0	1	3			
>2,5 m	0						1	1	2	2	2	3	3	4	6
	6 balconada			7 balconada			8 balconada			9 terraza					
										barandilla abierta			barandilla cerrada		
absorción del tejado (α_w) ⇒	≤0,3	0,6	≥0,9	≤0,3	0,6	≥0,9	≤0,3	0,6	≥0,9	≤0,3	0,6	≥0,9	≤0,3	0,6	≥0,9
línea de mira sobre la fachada: <1,5 m	-1	-1	0	0	0	1	1	1	2	1	1	1	3	3	3
(1,5-2,5) m	-1	1	3	0	2	4	1	1	2	3	4	5	5	6	7
>2,5 m	1	2	3	2	3	4	1	1	2	4	4	5	6	6	7

Tabla 2: Diferencia de niveles sonoros debido a la forma de la fachada para las diferentes formas de la fachada y distintas orientaciones de la fuente acústica

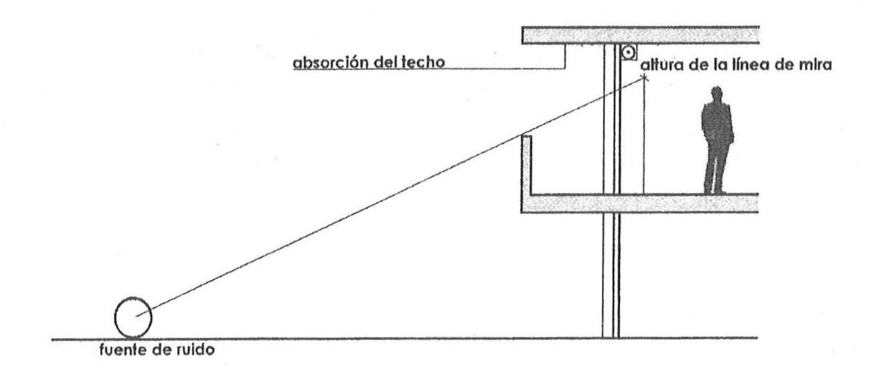


Figura 6. Parámetros relevantes en la diferencia de niveles sonoros debido a la forma de la fachada

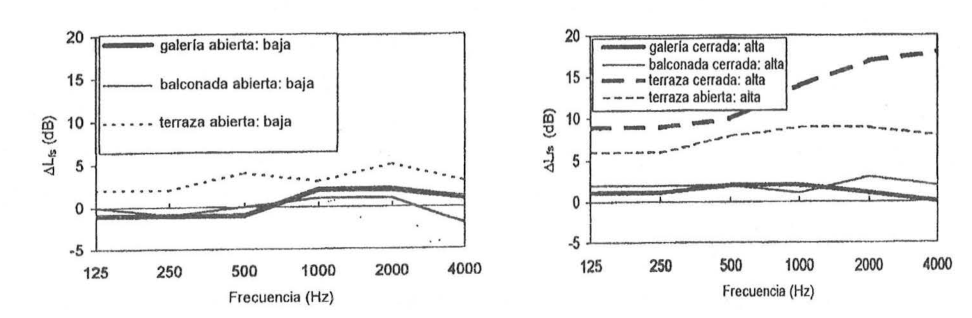


Figura 7: Diferencia de nivel sonoro debido a la forma de las fachadas con relieve en función de la frecuencia en bandas de octava.

9.- EL AISLAMIENTO A RUIDO AÉREO DE LA PARTE CIEGA DE LA FACHADA

Los muros de fachada adoptan diferentes tipologías, desde cerramientos monocapa a multicapas. En este apartado se realizará un breve repaso de las propiedades más importantes del índice de reducción acústica de los elementos constructivos de una y dos capas.

9.1 **Elementos constructivos simples**

Una partición simple se define como aquella que tiene sus dos caras exteriores rígidamente unidas, de forma que se mueven como si fueran una. Son particiones delgadas y homogéneas, por ejemplo yeso laminado, tableros de fibra de madera, vidrios, paredes de hormigón, ladrillos, etc. Los parámetros físicos que tienen mayor influencia en el índice de reducción acústica a ruido aéreo R, de un elemento constructivo de una partición simple son: la masa, la rigidez de la partición, las resonancias, los efectos de coincidencia, la frecuencia de las ondas acústicas y su ángulo de incidencia con la partición. En acústica de la edificación las frecuencias de interés están entre 100 y 5000 Hz.

Existen diferentes expresiones teóricas para calcular el índice de reducción acústica según la frecuencia del sonido incidente sobre el elemento constructivo simple. Entre los valores de la frecuencia natural de la partición en el vacío f_0 y la frecuencia crítica f_c se suele utilizar una ley semiempírica denominada *Ley de masa a incidencia de campo* que se escribe

$$R_{campo} \approx 20\lg(m'f/m_0') - 48 \quad dB \qquad [31]$$

m' es la masa por unidad de superficie del elemento constructivo en kg/m^2; f es la frecuencia del sonido incidente en Hz, m'_0 = 1 kg/m^2. Según la expresión anterior el índice de reducción acústica R, aumenta 6 dB cada vez que se duplica la masa o la frecuencia.

Zona controlada por la coincidencia

La expresión anterior del índice de reducción acústica R, no tiene en consideración las vibraciones de flexión de la partición. A partir de una determinada frecuencia llamada crítica, hay una disminución importante del índice de reducción acústica debido al fenómeno de coincidencia. El fenómeno de coincidencia se manifiesta en un intervalo de frecuencias que va desde valores algo inferiores al de la frecuencia crítica hasta apróximadamente una octava por encima de esta.

En el aire, el sonido se propaga mediante ondas longitudinales y su velocidad es la misma para todas las frecuencias. Cuando en un sólido se produce una deformación forzada localizada, se originan ondas libres que se propagan por todo el sólido. Si la partición de una hoja es lo suficientemente delgada, se producen ondas de flexión, que al contrario que otros tipos de ondas, se propagan con una velocidad función de la frecuencia. Existirá una frecuencia llamada crítica, a partir de la cual habrá un ángulo de incidencia, en el que se cumpla que la traza de la longitud de onda del sonido en el aire, coincida con la longitud de la onda de flexión. Esta condición se conoce como efecto de coincidencia, (coincidence effect o trace-matching). *La frecuencia crítica de coincidencia se define como la menor frecuencia a la que se produce el efecto de coincidencia* y corresponde a un ángulo de incidencia de 90°.

Los elementos de la partición son solicitados por dos ondas, la onda aérea incidente, (forzada), y la onda de flexión, (libre). La traza de la onda aérea avanza por la partición con una velocidad $c/\mathrm{sen}\theta$ y la onda de flexión con una velocidad c_f. Cuando las dos velocidades a lo largo de la partición son iguales, los efectos se acumulan y existe una gran radiación de energía por la partición. La disminución del índice de reducción acústica es importante en la zona de coincidencia. La disminución, será mayor o menor, en función del valor del factor de pérdidas. En la práctica el factor de pérdidas total η_t de una partición tiene en consideración el factor de pérdidas internas, las pérdidas debidas a la radiación de las ondas de flexión libres y las pérdidas de acoplamiento en el perímetro de la partición.

La frecuencia crítica de la partición se obtiene de la fórmula

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi}\sqrt{\frac{m'}{B}} = \frac{c^2}{2\pi d}\sqrt{\frac{12\rho(1-\nu^2)}{E}} = \frac{c^2}{1{,}8 c_L d} \quad Hz \qquad [32]$$

d, es el espesor de la partición en metros; m´ = ρd, la masa de la partición por unidad de superficie; B, la rigidez dinámica de la partición por unidad de ancho; ρ la densidad del material de la partición; E, el módulo de Young y ν, el coeficiente de Poisson, c_L, la velocidad de las ondas longitudinales en la partición y c la velocidad del sonido en el aire. La frecuencia crítica y el espesor de una partición son magnitudes inversamente proporcionales.

En la Tabla 3 se muestran los valores aproximados del producto de la frecuencia crítica y el espesor del material. f_c.d y factor de pérdidas internas de algunos materiales usuales en la construcción.

MATERIAL	Producto de la frecuencia crítica y el espesor del material. f_c.d, (m/s).	Factor de pérdidas internas, η
Acero	12,4	$1 - 6.10^{-4}$
Aluminio	12	10^{-4}
Cobre	17,8	2.10^{-3}
Hierro	17,5	$1 - 6.10^{-4}$
Latón	20	$< 10^{-3}$
Plomo	52	$0{,}5 - 2.10^{-3}$
Hormigón(denso, ligero, poroso)	17 a 33	$1 - 5.10^{-2}$
Ladrillo, varía según el tipo	22 a 37	$1 - 2.10^{-2}$
Vidrio	12,7	$0{,}6 - 2 . 10^{-2}$
Yeso	34	$0{,}6 - 3.10^{-2}$
Madera	20 a 23	$0{,}8 - 1.10^{-2}$

Tabla 3: Producto de la frecuencia crítica y el espesor del material y el factor de pérdidas internas.

EJEMPLO 3

Se desea que una placa de acero a la frecuencia de 500 Hz tenga un índice de reducción acústica R = 40 dB. ¿ Cuál debe ser el espesor de la placa? Datos del acero: ρ = 7.700 kg/m^2, c_L = 5.100 m/s

SOLUCIÓN

Se hace un tanteo en la zona controlada por la masa

$$R = 20.\log(m' f) - 48 \; dB \; ; \; m' = \rho.d$$

40 = 20.log(7.700.d f) – 48; 7.700.(500) d = $10^{4,4}$; d = 0,0065 m

La frecuencia crítica $f_c = \frac{c^2}{1{,}8.c_L h} = \frac{340^2}{1{,}8.(5100).0{,}0065} = 1930 \quad Hz$

La frecuencia de 500 Hz está en la zona controlada por la masa, f < f_c. El espesor de la placa debe ser 6,5 mm.

Índice de reducción acústica de elementos estructurales homogéneos de una hoja en laboratorio.

Para los elementos estructurales monolíticos habituales el índice de reducción acústica en laboratorio, R, puede determinarse de manera muy precisa. En la Tabla 4 se muestran los valores del índice de reducción acústica calculado en bandas de octava para el caso de algunas estructuras monolíticas, según muestra la Norma EN 12354-1:2000. Acústica en la edificación. Estimación de las características acústicas de las edificaciones a partir de las características de sus elementos. Parte 1: Aislamiento acústico del ruido aéreo entre recintos. Los índices globales se han calculado a partir de los valores en bandas de octavas según la Norma EN ISO 717-1. De los resultados de las mediciones realizadas en los diferentes laboratorios europeos, en los casos que no se disponga de datos de mediciones, para elementos homogéneos de una hoja construidos con ladrillos cerámicos, hormigón, bloques de silicato de calcio, bloques de yeso, hormigón aireado fabricado en autoclave y varios tipos de hormigón aligerado, puede utilizarse para estimar de forma aproximada el índice ponderado de reducción acústica R_w la siguiente expresión (EN 12354-1):

$$m' > 150 \text{ kg/m}^2 \qquad R_w = 37{,}5 . \lg (m'/m'_0) - 42 \text{ dB} \qquad [33]$$

$m'_0 = 1$ kg/m^2

Para los términos de adaptación espectral se considera:

C es aproximadamente constante, entre –1 y –2 dB.

$C_{tr} = 16 - 9.\lg (m'/m'_0)$ dB, limitado por $-7 \leq C_{tr} \leq -1$ dB

El mortero y el yeso utilizado pueden incluirse en la determinación de la densidad superficial. Cualquier elemento estructural con agujeros no puede ser considerado como homogéneo, a menos que la dimensión de los agujeros sea pequeña y que el volumen de los agujeros sea menos de un 15 % del volumen total.

Según el DB HR Protección contra el ruido del CTE. El Índice global de reducción acústica de un elemento constructivo, ponderado A, R_A es la valoración global, en dBA, del índice de reducción acústica, R, para un ruido incidente rosa normalizado, ponderado A.

En el citado DB HR se indica que los índices de reducción acústica se determinarán mediante ensayo en laboratorio. No obstante, y en ausencia de ensayo, puede decirse que el índice de reducción acústica proporcionado por un elemento constructivo de una hoja de materiales homogéneos, es función casi exclusiva de su masa y son aplicables las siguientes expresiones, ley de masa, que determinan el aislamiento R_A, en función de la masa por unidad de superficie, m´, expresada en kg/m^2:

$$m' \leq 150 \text{ kg/m}^2 \qquad R_A = 16{,}6 . \lg (m'/m'_0) + 5 \text{ dBA} \qquad [34]$$

$$m' \geq 150 \text{ kg/m}^2 \qquad R_A = 36{,}5 . \lg (m'/m'_0) - 38{,}5 \text{ dBA} \qquad [35]$$

El uso de las leyes de masa anteriores puede producir desviaciones de ± 2 dB, por lo que en los proyectos deberá tenerse en cuenta esta circunstancia.

Construcción	Masa Kg/m^2	Índice de reducción acústica, dB en bandas de octava, Hz							$R_w(C,C_{tr})$
		63	125	250	500	1 k	2 k	4 k	
120 mm de hormigón	276	35	34	36	46	54	62	69	49(-2,-6)
260 mm de hormigón	598	43	42	51	59	67	74	75	61(-1,-7)
110 mm de bloques de Ca-Si	193	34	34	33	39	49	58	65	44(-1,-4)
240 mm de bloques de Ca-Si	420	38	38	46	54	62	68	68	56(-1,-6)
120 mm de hormigón ligero	156	33	36	34	35	44	53	56	42(-1,-3)
300 mm de hormigón ligero	390	37	37	42	51	58	58	58	54(-2,-6)
100 mm de hormigón aireado fabricado en autoclave	65	26	30	31	27	32	41	45	32(0,-1)
200 mm de hormigón aireado fabricado en autoclave	130	30	30	29	34	43	46	46	39(-1,-3)

Tabla 4: Índice de reducción acústica calculado en bandas de octava para algunas estructuras monolíticas.

A partir de los valores del índice de reducción acústica R, obtenidos mediante ensayo en laboratorio, este índice en el DB HR se define mediante la expresión siguiente.

$$R_A = -10.\lg \sum_{i=1}^{i=n} 10^{(L_{Ar,i}-R_i)/10} \quad dBA \qquad [36]$$

siendo R_i el valor del índice de reducción acústica en la banda de frecuencia i, en dB; $L_{Ar,i}$ el valor del espectro normalizado de ruido rosa ponderado A, en la banda de frecuencia i, en dBA; i, recorre todas las bandas de tercio de octava de 100 Hz a 5 kHz. (Anexo A).

De forma empírica se encuentran las siguientes relaciones entre los índices globales de las ecuaciones [34] y [35]:

$R_w = R_A + 1$ dB;

$R_{Atr} = R_A - 4$ dBA

9.2 Elementos constructivos dobles

Para aumentar el aislamiento entre dos recintos sin incrementar mucho la masa, uno de los procedimientos consiste en dividir la partición en dos o más hojas separadas una distancia. El índice de reducción acústica del sistema depende del acoplamiento mecánico entre las hojas, las masas de las mismas, la profundidad de la cámara y la existencia o no de material absorbente acústico en la misma.

Una partición doble está constituida por dos particiones simples separadas por un espacio, relleno o no de material absorbente. Cuando las ondas sonoras del recinto emisor inciden sobre la primera hoja, esta se excita y transmite al aire situado en la cavidad entre hojas una vibración, que a continuación incide sobre la segunda hoja, y esta a su vez transmite energía sonora al recinto receptor.

Los factores más importantes a tener en cuenta en el índice de reducción acústica en particiones dobles son los siguientes:

- *Frecuencias críticas de las hojas*
Hay que evitar que las dos hojas tengan la misma frecuencia crítica, si esto ocurre la partición doble presentará un importante defecto de aislamiento en la banda de la frecuencia crítica.

- *Frecuencia de resonancia del sistema o frecuencia masa-aire-masa*
Una partición doble *sin material absorbente en la cavidad* se comporta como un sistema mecánico masa-muelle-masa. El sistema tiene una frecuencia de resonancia que cuando las ondas inciden perpendicularmente a la partición, se obtiene mediante la expresión:

$$f_{mam} = \frac{c}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{d}\left(\frac{1}{m_1^{'}} + \frac{1}{m_2^{'}}\right)} \quad [37]$$

que en forma aproximada se puede escribir

$$f_{mam} = 60\sqrt{\frac{1}{d}\left(\frac{1}{m'_1} + \frac{1}{m'_2}\right)} \quad [38]$$

d es la separación entre las dos hojas en metros, m'_1 y m'_2 son las masas superficiales de las paredes en kg/m^2. Cuando las ondas inciden aleatoriamente la frecuencia de resonancia se obtiene multiplicando el valor anterior por 1,4, es la situación más habitual (El factor 60 sustituirlo por 84).

Si la frecuencia del sonido incidente es mayor que la frecuencia de resonancia del sistema, el aislamiento de la partición doble es mejor que el de una partición simple de la misma masa. En la práctica hay que lograr que la frecuencia de resonancia del sistema esté por debajo de las frecuencias de interes, 70 Hz. La mejora del índice de reducción acústica de sistemas dobles comienza de forma aproximada una octava por encima de la frecuencia f_{mam}.

- Frecuencias de resonancia de la cavidad

En la cámara de aire existente entre las dos hojas, las ondas sonoras se propagan y se reflejan sobre las caras internas de las mismas y se originan ondas estacionarias. A las frecuencias de resonancia la presión sonora en la cavidad aumenta y se transmite más sonido por las hojas de la partición, el aislamiento de la partición presenta un mínimo.

Para ondas planas que se propagan en dirección normal a la partición, las frecuencias de resonancia de la cavidad se obtienen mediante la expresión:

$$d = n\frac{\lambda}{2} \quad ; \quad \lambda = \frac{2d}{n}$$

$$f_{rc} = \frac{c}{\lambda} = \frac{c.n}{2d} = \frac{170.n}{d} \qquad [39]$$

n = 1,2,3,.. , d en m. En general, únicamente las frecuencias de resonancia de la cavidad para los valores n = 1 y 2 son perjudiciales para el aislamiento de la pared doble. Hay que lograr que las frecuencias de resonancia de la cavidad superen los 4.000 Hz.

- Influencia de la colocación de material absorbente en la cavidad

La colocación de material absorbente en la cavidad modifica el acoplamiento acústico entre las dos hojas de la partición. Cuando en la cavidad se coloca material absorbente disminuye la frecuencia de resonancia del sistema aproximadamente al 70% del valor calculado para f_{mam}. El material absorbente en la cavidad elimina la frecuencia de resonancia de la cavidad y aumenta el aislamiento al ruido aéreo de la partición doble.

Desde la perspectiva del aislamiento acústico no es necesario el rellenar completamente la cavidad con material absorbente, el mayor aumento del aislamiento ocurre cuando el material absorbente ocupa el 25% de la anchura de la cámara. El material absorbente deberá tener una resistividad al flujo de aire mayor de 5 kPa.s/m^2, valor que cumplen la mayoría de los materiales fibrosos habituales. Se debe evitar el rellenar completamente la cámara de material absorbente de alta densidad.

La colocación en la cámara de materiales no porosos de células cerradas (espumas rígidas, poliestireno), reducen de forma apreciable el índice de reducción acústica del sistema.

En la práctica las transmisiones indirectas y la realización de las paredes dobles limitan la eficacia de los sistemas dobles.

En la Tabla 5 se muestran los valores globales y del índice de reducción acústica, medidos en laboratorio, de sistemas constructivos habituales en la edificación española.

10.- LAS VENTANAS Y SUS REQUISITOS EN EL PROYECTO ARQUITECTÓNICO.

Una ventana, es un elemento constructivo que sirve, de una forma funcional y estética, para cerrar el hueco de fachada. Es la parte transparente de la fachada que permite la relación interior/exterior, así como la entrada de aire, iluminación natural, radiación solar y la visión en ambos sentidos. Aproximadamente el 90 % de la ventana es vidrio, soportado sobre unos bastidores de diferentes materiales: madera, aluminio, PVC, poliuretano y mixtos, que permiten la apertura y el cierre de la ventana y protegen el interior de las inclemencias externas y del ruido.

Las ventanas con independencia de la materia prima de sus perfiles y sistema de apertura, tienen características fundamentales que afectan a la satisfacción de los requisitos básicos de la edificación. Se concretan en las siguientes características técnicas armonizadas definidas en la norma de producto prEN 14351-1: Reacción al fuego; mecanismos de seguridad para ventanas abisagradas y pivotantes; resistencia al impacto, a las acciones del viento, nieve y cargas permanentes; estanquidad al agua; emisión de sustancias peligrosas; aislamiento acústico a ruido aéreo; permeabilidad al aire; resistencia térmica y propiedades frente a la radiación solar.

Las características de las ventanas deberán establecerse en el proyecto especificando las prestaciones de permeabilidad al aire, estanquidad al agua, resistencia al viento, aislamientos térmico y acústico y durabilidad mecánica de acuerdo con la normativa vigente y de las características del edificio, como son entre otras, su ubicación, su situación dentro del mismo, su sistema de calefacción/refrigeración y de renovación de aire. Es recomendable seguir la UNE 85220 que da los criterios de elección de características de las ventanas relacionadas con su ubicación y aspectos ambientales.

Una ventana está formada por un bastidor y el vidrio, así como el marco, en consecuencia existe un problema de juntas entre los dos. Un elemento de la fachada convencional es la persiana enrollable de cajón y cinta. Comenzó a utilizarse a principios del siglo XX y se popularizó rápidamente.

La primera característica de las ventanas, que afecta su funcionalidad, es el sistema de apertura de la parte practicable.

En la ventana practicable batiente el accionamiento de la manilla hace que la hoja presione el marco fijo al cerramiento, lo que hace disminuir la penetración del aire, mejora el cierre y permite mejorar la clasificación de permeabilidad al aire y aumenta el aislamiento acústico a ruido aéreo, pero hay que dejar libre de forma permanente el espacio que barre la hoja al abrir.

La ventana de corredera no ocupa ningún espacio fuera del volumen del cerramiento ciego, pero el cierre es menos estanco y no permite bajas permeabilidades al aire ni elevado aislamiento acústico.

En la figura 8 se muestran las tipologías de ventanas más habituales en España.(UNE-EN 12519).

Descripción del sistema constructivo	Masa por unidad de superficie Kg/m²	Índice de reducción acústica, R; dB						Valores globales (100-5000 Hz)	
		125	250	500	1 k	2 k	4 k	R_A dBA	$R_W(C;C_{tr})$ dB
Pared de rasillón hueco doble de 70 mm, enlucido de yeso 10 mm por una cara	57	26,3	26	27,9	31,1	35,3	37,5	32,1	32(0;-2)
Citara de l.c.p; e = 12 cm., guarnecido de yeso 15 mm, en cada lado.	185	40,5	34,5	42,5	51	58,5	64	47	47(0;-4)
Citara de l.c.p., enfoscado de 15 mm, cámara de 40 mm, ladrillo hueco sencillo. Sin lana mineral	265	44	45	46,5	51,2	63	74,5	52,4	52(0;-3)
Citara de l.c.p., enfoscado de 15 mm, cámara de 50 mm rellena de lana mineral, ladrillo hueco doble 70 mm.	305	42,2	42,4	43,1	50,9	63	72,4	50,1	50(0;-3)
Citara de l.c.p., enfoscado de cemento, cámara de 60 mm rellena de fibra de vidrio, densidad 20 kg/m². Dos placas de yeso laminado de espesor 15 mm, con entramado autoportante de aluminio.	212	35,5	44,3	53,7	65,4	78,6	78,5	54,7	55(-1;-7)

Tabla 5. Resultados obtenidos en laboratorio del aislamiento a ruido aéreo de sistemas constructivos habituales en la edificación española.

Tradicionalmente, la ventana ha venido utilizándose, además de para iluminar y relacionarse con el exterior, para posibilitar la ventilación de los recintos y la aireación, todo ello basado en una ventilación cruzada o efecto chimenea, pero en todo caso, provocado por la presión del aire exterior, presión irregular que, para garantizar siempre una aireación correcta, no puede menos que producir infiltraciones excesivas en algunos momentos.

Para limitar la demanda energética del edificio se suelen considerar las siguientes prestaciones de las ventanas (prEN 14351-1): permeabilidad al aire, trasmitancia térmica, la condensación en las ventanas, propiedades frente a la radiación solar.

La permeabilidad al aire es la propiedad de una ventana cerrada de dejar pasar aire cuando se encuentra sometida a una presión diferencial. Se mide por el caudal de aire (m^3/h) que atraviesa la ventana para distintas presiones de aire.

La clasificación de las ventanas se basa en una comparación de la permeabilidad al aire de la muestra de ensayo por referencia a la superficie total, y su permeabilidad al aire por referencia a la longitud de la junta de apertura.

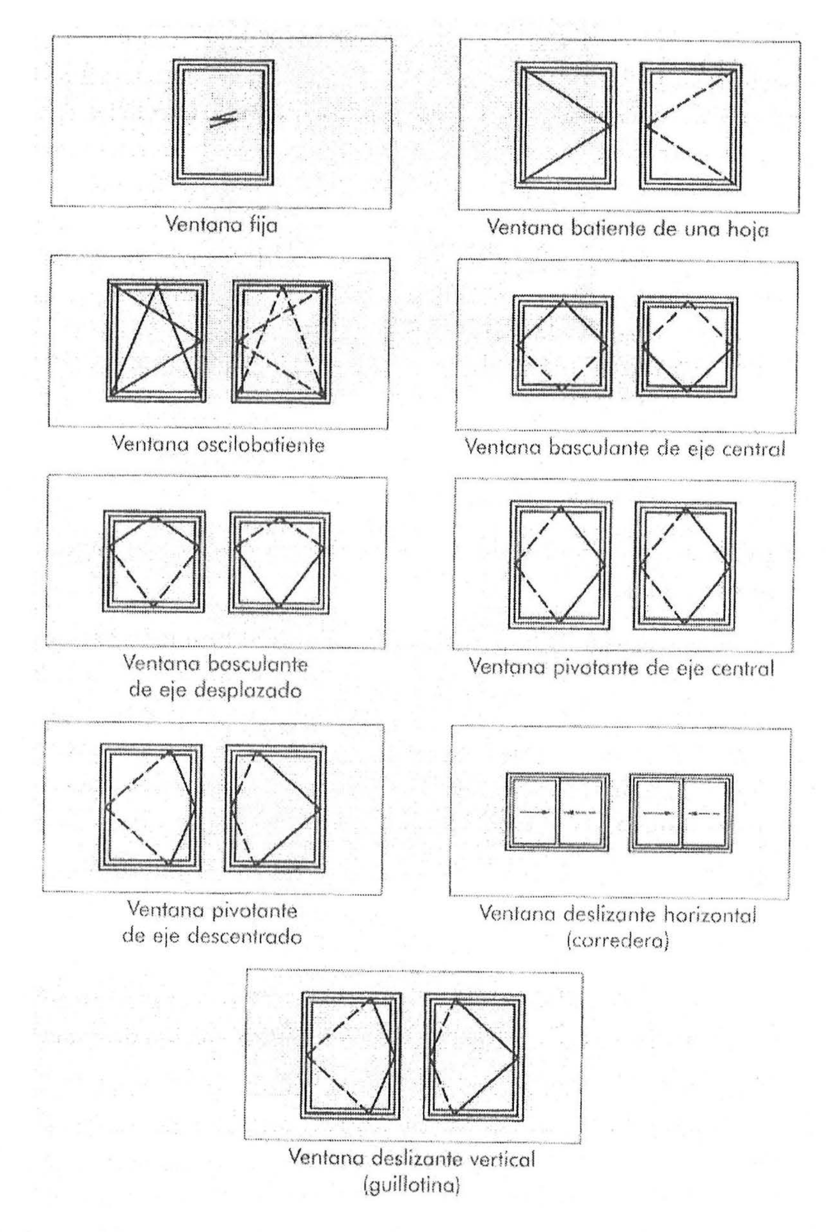


Figura 8. Tipologías habituales de las ventanas en España.

Las carpinterías exteriores, el grado de permeabilidad al aire, la masa del acristalamiento, cajas de persiana y el sistema de montaje, influyen de manera decisiva en el aislamiento al ruido aéreo de la fachada de un recinto. La elección de la clase de ventana para un determinado emplazamiento, debe hacerse de forma que responda a la más exigente entre todas las que se tienen que considerar para cada característica.

La Norma UNE-EN 12207 clasifica las ventanas y puertas completamente instaladas de cualquier material según su permeabilidad al aire de su superficie

total y de sus juntas de apertura, ver figura 9. Para establecer la permeabilidad al aire mínima exigible a cada una de las ventanas del edificio, el CTE establece que la permeabilidad al aire de las carpinterías, medida con una sobrepresión de 100 Pa y referida a la superficie total, tendrá unos valores inferiores a los siguientes: En las zonas climáticas A y B: 50 $m^3/h.m^2$ (Las ventanas deben ser como mínimo de clase 1).En las zonas climáticas C, D y E: 27 $m^3/h.m^2$, (las ventanas deben ser de clase 2 como mínimo). Se establecen 12 zonas climáticas identificadas mediante una letra, correspondientes a la división de invierno, y un número correspondiente a la división de verano.

Cuando en un recinto se instalan ventanas clasificadas Clase 3 o 4 es posible la aparición de condensaciones en las superficies interiores de los cerramientos. Por ello será necesario incorporar sistemas de renovación de aire, estudiados acústicamente, de manera que garanticen la adecuada renovación del aire del recinto sin necesidad de abrir la ventana.

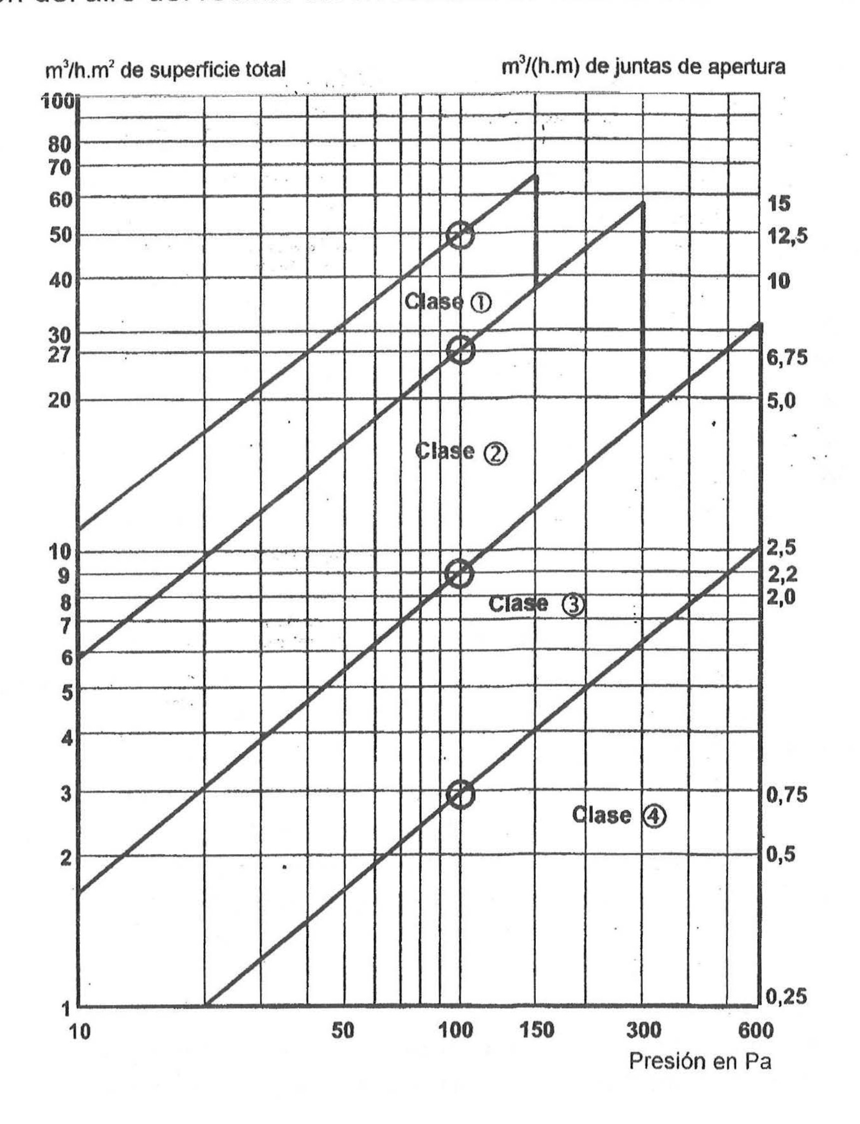


Figura 9. Clasificación de las ventanas y puertas instaladas según su permeabilidad al aire. (Norma UNE-EN 12207).

11.- AISLAMIENTO ACÚSTICO A RUIDO AÉREO DEL VIDRIO

El vidrio es un elemento fundamental en las ventanas. Ofrece muchas posibilidades de utilización combinando prestaciones y apariencias diferentes. El vidrio utilizado habitualmente en la construcción es un compuesto silico-sodo-cálcico. Su densidad es 2500 kg/m^3. Es un material elástico (módulo de Young: E = $7{,}2.10^{10}$ Pa, módulo de elasticidad transversal: G = $2{,}9.10^{10}$ Pa; coeficiente de Poisson: $\nu = 0{,}22$) y frágil.

Vidrio monolítico

Su índice de reducción acústica aumenta con el espesor del vidrio. En el intervalo de frecuencias próxima a la frecuencia crítica, el índice de aislamiento acústico disminuye de 10 a 15 dB. La frecuencia crítica del vidrio monolítico depende de forma inversamente proporcional del espesor del vidrio, h, de acuerdo con la expresión: $f_c = \dfrac{1280}{h\ cm}\ Hz$. Por ejemplo, un vidrio con un espesor de 4 mm su frecuencia crítica es aproximadamente 3200 Hz. Al aumentar el espesor del vidrio la frecuencia crítica se desplaza hacia las frecuencias medias. La limitación de la demanda energética del edificio no permite la utilización de vidrios sencillos en recintos habitables protegidos.

Vidrio laminado

El vidrio laminado está compuesto por dos o más vidrios unidos por material plástico, el más utilizado en la edificación y en las fachadas es el butiral de polivinilo PVB. Es un material plástico con excelentes propiedades de adherencia, transparencia y tenacidad, por lo que da lugar a vidrios que responden a las exigencias de los vidrios laminados de seguridad, sobresaliendo su resistencia a la penetración. Ofrece buenas cualidades ópticas, aumenta el índice de reducción acústica (butiral especial acústico, PVB(A)) y constituye una verdadera protección contra la radiación ultravioleta.

El índice de reducción acústica de un vidrio laminar es varios dB superior al de un vidrio monolítico del mismo espesor, sobre todo en la zona de la frecuencia crítica. Los vidrios laminares acústicos tienen mejor aislamiento acústico a ruido aéreo que los vidrios laminares tradicionales de la misma composición. El vidrio laminar con PVB(A), prácticamente elimina el efecto de coincidencia.

La nomenclatura en los vidrios laminados es la siguiente: xx,y a: x indica el espesor de cada vidrio componente del laminar en mm; y indica el número de capas de butiral de 0,38 mm de espesor; a indica que el butiral es de tipo acústico.

Acristalamiento doble

Pueden ser vidrios monolíticos o laminados, separados por una cámara. En la utilización del acristalamiento doble, se tiene que considerar lo siguiente:

- Las frecuencias críticas de cada uno de los vidrios. Se aconseja que desde el punto de vista del aislamiento acústico a ruido aéreo los dos vidrios sean de diferente espesor.

- La frecuencia f_{mam} del sistema. Debe ser lo más baja posible, se consigue con vidrios gruesos y aumentando la distancia entre ellos. En la práctica al ser la cámara de 4 a 16 mm, la frecuencia f_{mam} se sitúa en las bajas frecuencias y el índice de reducción acústica no es generalmente superior al de un vidrio monolítico de espesor la suma de los espesores del vidrio doble.

- Las frecuencias de resonancia de la cavidad.

El mayor índice de reducción acústica de los vidrios dobles se consigue cuando los vidrios están separados más de 20 mm y la relación de los espesores de los vidrios sea 1:2. La introducción de un gas especial, SF6, en la cámara mejora el índice de reducción acústica a medias y altas frecuencias, disminuyendo a frecuencias bajas.

El aislamiento térmico de los vidrios dobles es muy superior al proporcionado por un vidrio monolítico. Disminuye las pérdidas de energía térmica en el recinto y el efecto de la pared fría. El aumento del espesor de la cámara y la colocación de vidrios de baja emisividad aumentan de manera importante el aislamiento térmico.

En la tabla 6 se muestran los índices de reducción acústica de diferentes tipos de vidrio de acuerdo con la norma UNE-EN 12354-1.

Tipo de vidrio	Índice de reducción acústica, R, dB						
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	$R_w(C,C_{tr})$, dB
Vidrio sencillo, mm							
3	14	19	25	29	33	25	28(-1,-4)
4	17	20	26	32	33	26	29(-2,-3)
5	19	22	29	33	29	31	30(-1,-2)
6	18	23	30	35	27	32	31(-2,-3)
8	20	24	29	34	29	37	32(-2,-3)
10	23	26	32	31	32	39	33(-2,-3)
12	27	29	31	32	38	47	34(0,-2)
Vidrio laminado + lámina plástica (0,5-1) mm							
6 +	20	23	29	34	32	38	32(-1,-3)
8+	20	25	32	35	34	42	33(-1,-3)
10+	24	26	33	33	35	44	34(-1,-3)
Vidrio doble con vidrios sencillo o laminado, (mm), cavidad llena de aire e = (6-16) mm							
4-(6-16)-4	21	17	25	35	37	31	29(-1,-4)
6-(6-16)-4	21	20	26	38	37	39	32(-2,-4)
6-(6-16)-6	20	18	28	38	34	38	31(-1,-4)
8-(6-16)-4	22	21	28	38	40	47	33(-1,-4)
8-(6-16)-6	20	21	33	40	36	48	35(-2,-6)
10-(6-16)-4	24	21	32	37	42	43	35(-2,-5)
10-(6-16)-6	24	24	32	37	37	44	35(-1,-3)
6-(6-16)-6+	20	19	30	39	37	46	33(-2,-5)
6-(6-16)-10+	24	25	33	39	40	49	37(-1,-5)

Tabla 6: Índice de reducción acústica según el tipo de vidrio.(UNE-EN 12354-3).

EJEMPLO 4

De un sistema formado por vidrio doble 4(12) 4 mm. Hállense las frecuencias de interés en el aislamiento a ruido aéreo.

SOLUCIÓN

- Frecuencias críticas de las hojas de vidrio: $f_c = \frac{1280}{0,4} = 3200 \quad Hz$

- Frecuencia de resonancia del sistema

  Se considera que la incidencia es aleatoria:

$$f_{mam} = 84\sqrt{\frac{1}{d}(\frac{1}{m'_1} + \frac{1}{m'_2})} = 84\sqrt{\frac{1}{0,012}\left(\frac{1}{10} + \frac{1}{10}\right)} \approx 343 \; Hz$$

- Frecuencias de resonancia de la cavidad

Considerando ondas planas que se propagan normalmente a los dos hojas, las ondas estacionarias se producen a unas frecuencias tales que la distancia entre las dos hojas ,d, sea un múltiplo de la semilongitud de onda

$$f_{rc} = \frac{c.n}{d} = \frac{170.n}{d} \qquad n = 1, 2, 3, ...; \quad d \text{ en m}$$

n =1 $\qquad f_{1rc} =$ 14.166 Hz

Está fuera del rango de interés en la acústica de la edificación. En la Tabla 6 se puede comprobar que el comportamiento de este tipo de vidrio en los ensayos de laboratorio coincide con las previsiones teóricas. (Bandas de octava de 250 Hz y 4 kHz).

Las figuras 10 y 11 muestran los resultados de las mediciones realizadas en laboratorio de diversos tipos de acristalamiento.

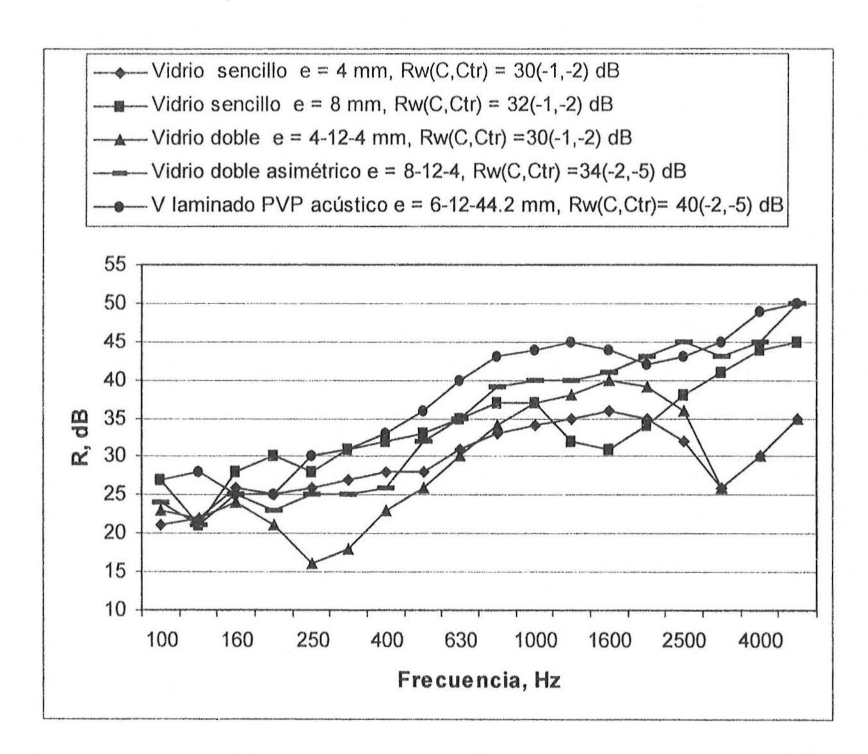


Figura10: Índice de reducción acústica de diferentes tipos de acristalamiento.

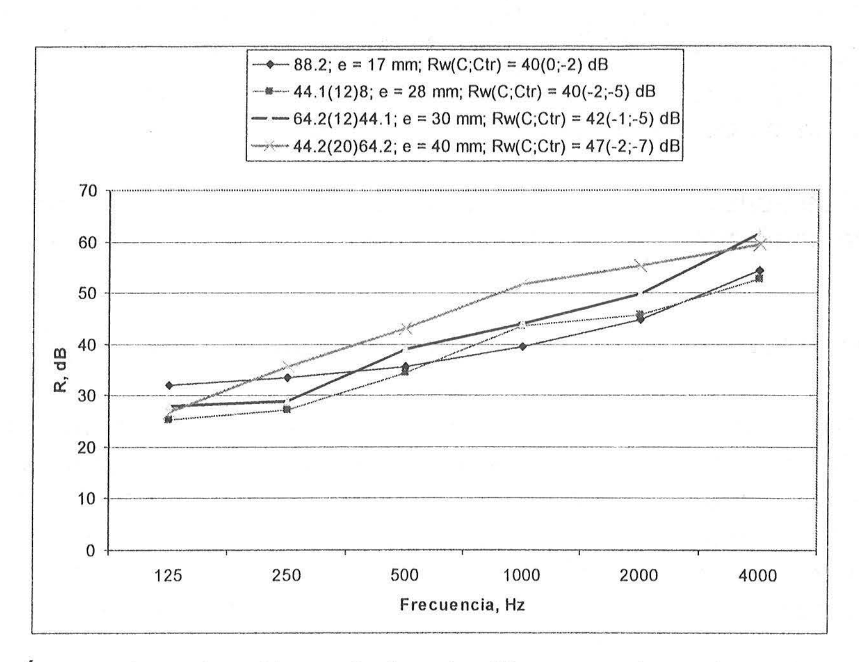


Figura11: Índice de reducción acústica de diferentes tipos de acristalamiento de altas prestaciones

12.- EL AISLAMIENTO ACÚSTICO A RUIDO AÉREO DE LAS VENTANAS.

El índice de reducción acústica del cerramiento del hueco es determinante en el aislamiento acústico a ruido aéreo de la fachada. Los valores del aislamiento proporcionado por las ventanas se deben determinar mediante ensayo realizado en laboratorio.

De la expresión [19], se deduce que el índice de reducción acústica de la fachada mixta formada por una parte ciega y una ventana está condicionado por el índice de reducción acústica de la ventana y, es como máximo 10 dB mayor a R_V.

Una expresión analítica para determinar el índice de reducción acústica de la ventana en función del índice de reducción acústica mixto de la fachada y de las superficies respectivas de la ventana y de la parte ciega, sin tener en cuenta la existencia de cajón de persiana, ni las transmisiones indirectas, es la siguiente:

$$R_V = 10.\lg\left[\frac{S_v}{\dfrac{S_v + S_c}{10^{0,1R_m}} + \dfrac{S_c}{10^{0,1R_c}}}\right] \quad dB \qquad [40]$$

donde:

R_V es el índice de reducción acústica de la ventana; R_m es el índice de reducción acústica mixto de la fachada; R_c es el índice de aislamiento acústico de la parte ciega; S_V área de la superficie de la ventana; S_c área de la parte ciega.

En el índice de reducción acústica de las ventanas hay que considerar los factores siguientes: Tipo de acristalamiento, dimensiones del acristalamiento; el tipo de carpintería, las juntas y uniones, el sistema de apertura de la ventana, la existencia de persianas y cajón de persiana.

El tipo de acristalamiento y sus dimensiones son los factores más importantes y se han analizado en apartados anteriores.

INFLUENCIA DEL BASTIDOR DE LA VENTANA

El bastidor de la ventana es el conjunto de perfiles sin paneles que constituyen tanto las partes fijas como las partes móviles de las ventanas y que quedan dentro del cerco. La influencia del bastidor del cerramiento del hueco depende:
- De las prestaciones acústicas de la parte acristalada, cuanto mayor sea el índice de reducción acústica del vidrio, mayor será la influencia del bastidor.
- Del porcentaje de la superficie del bastidor respecto al área del hueco.

El bastidor debe presentar poca permeabilidad al aire, tanto las partes móviles como las fijas. Las juntas entre el vidrio y el perfil, así como las juntas entre los diversos perfiles pueden ser las causas de disminución del índice de reducción acústica. La existencia de juntas defectuosas disminuyen el índice de reducción acústica a altas frecuencias e incluso a medias.

En los ensayos realizados en laboratorio, de ventanas con buenas carpinterías, con el mismo tipo de acristalamiento y sistema de apertura, los índices de reducción acústica de las ventanas son semejantes con independencia de que los bastidores sean de madera, aluminio o PVC. El uso de buenos acristalamientos no es eficaz en carpinterías de mala calidad.

- Las juntas entre el hueco de obra y el marco deben estar correctamente selladas.

INFLUENCIA DEL SISTEMA DE APERTURA DE LA VENTANA

El aislamiento acústico de las ventanas depende fundamentalmente de la permeabilidad al aire de las carpinterías y del acristalamiento elegido. El índice de reducción acústica de las ventanas de apertura batiente es superior al de la ventana deslizante, sobre todo a altas frecuencias, pues el sistema de cierre de las ventanas deslizantes es muy permeable al aire, y el ruido penetra por las holguras entre las hojas. En el caso de ventanas correderas sin sistema de presión sobre el marco, la curva de aislamiento no varía de forma importante, aún aumentando el espesor del vidrio. Las figuras 12 y 13 muestran este comportamiento en laboratorio.

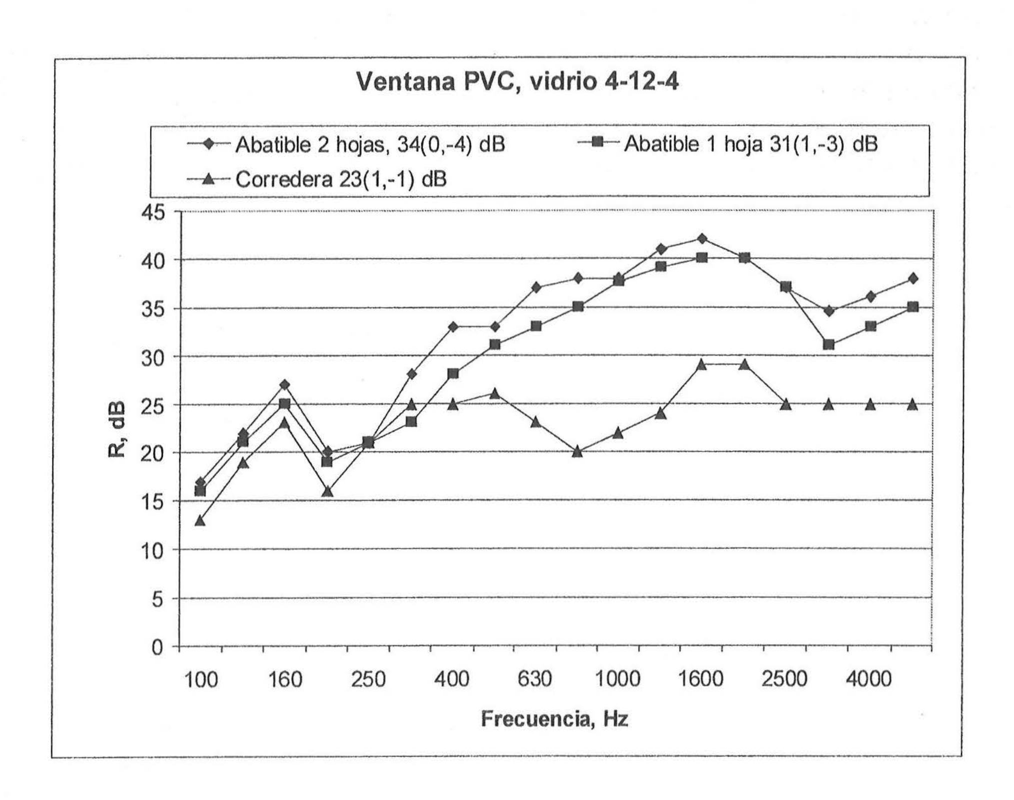


Figura 12. Comparación de los índices de reducción acústica de ventanas de PVC de ventanas batientes y correderas con el mismo tipo de vidrio.

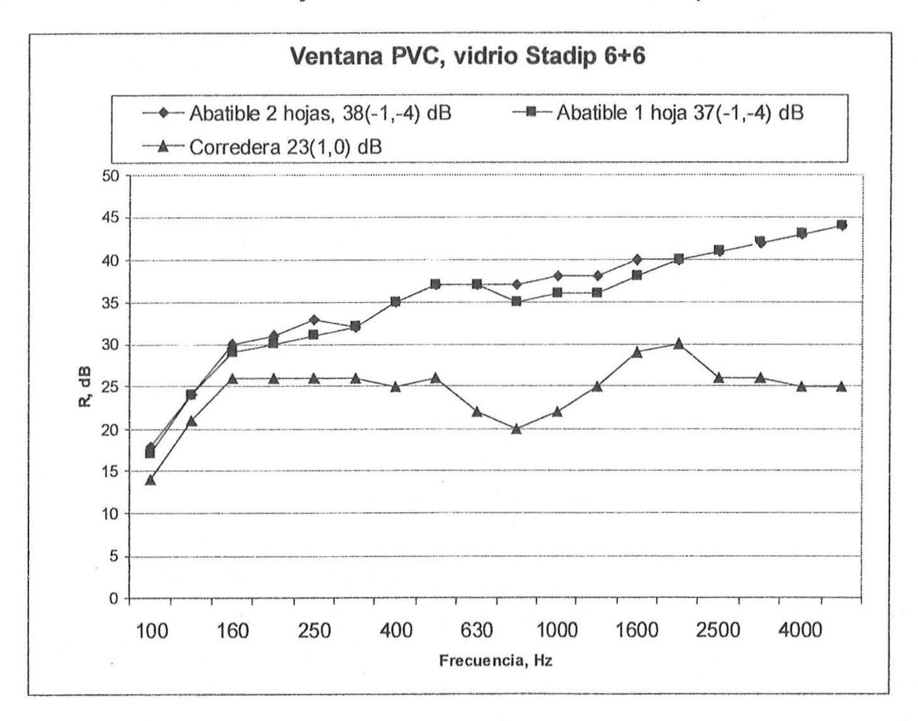


Figura 13. Comparación de los índices de reducción acústica de ventanas de PVC de ventanas batientes y correderas con el mismo tipo de vidrio laminar.

En la figura 14 se muestra los resultados medidos in situ de la Diferencia de nivel estandarizada ponderada, $D_{ls,2m,nT,w}$ $+C_{tr}$, en varias docenas de fachadas planas de dormitorios. En recintos de las mismas características (áreas de la

fachada, parte ciega y ventanas), con ventanas sencillas de carpintería de aluminio, con cajón de persiana prefabricado sin tratamiento acústico, vidrios dobles de espesores 4(6 -12)4, cuando el sistema de apertura de la ventana es batiente la magnitud $D_{nT,w} + C_{tr}$ es superior en 3 dB, a cuando la apertura de la ventana es deslizante o corredera. (Datos geométricos promedios de los recintos: Volumen = 30 m^3, $A_{fachada}$ = 10,2 m^2, A_{hueco} = 2,1 m^2)

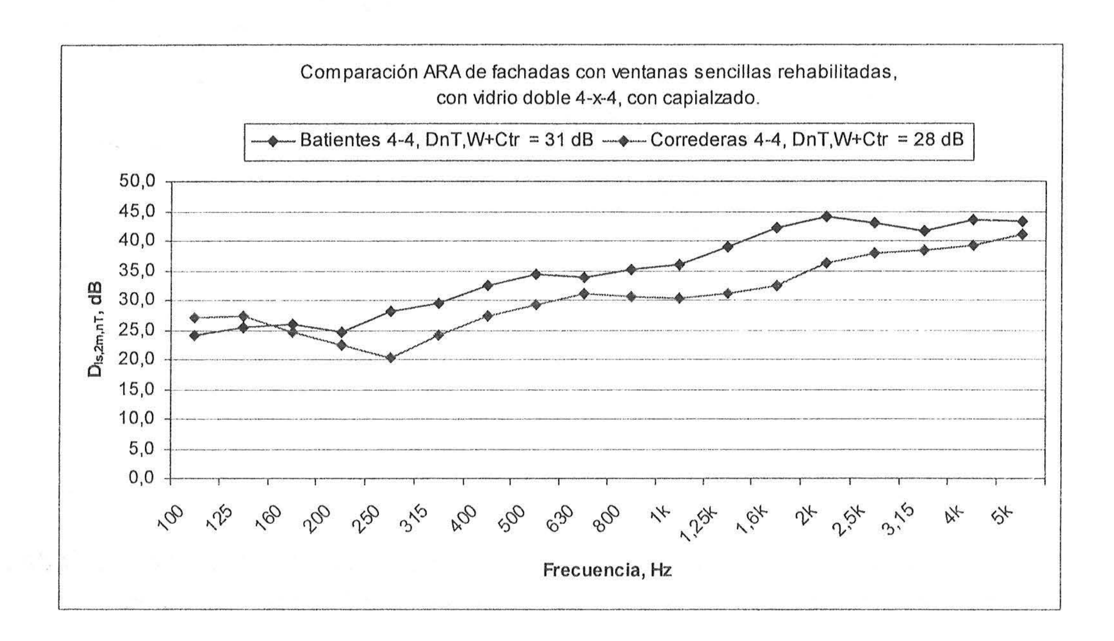


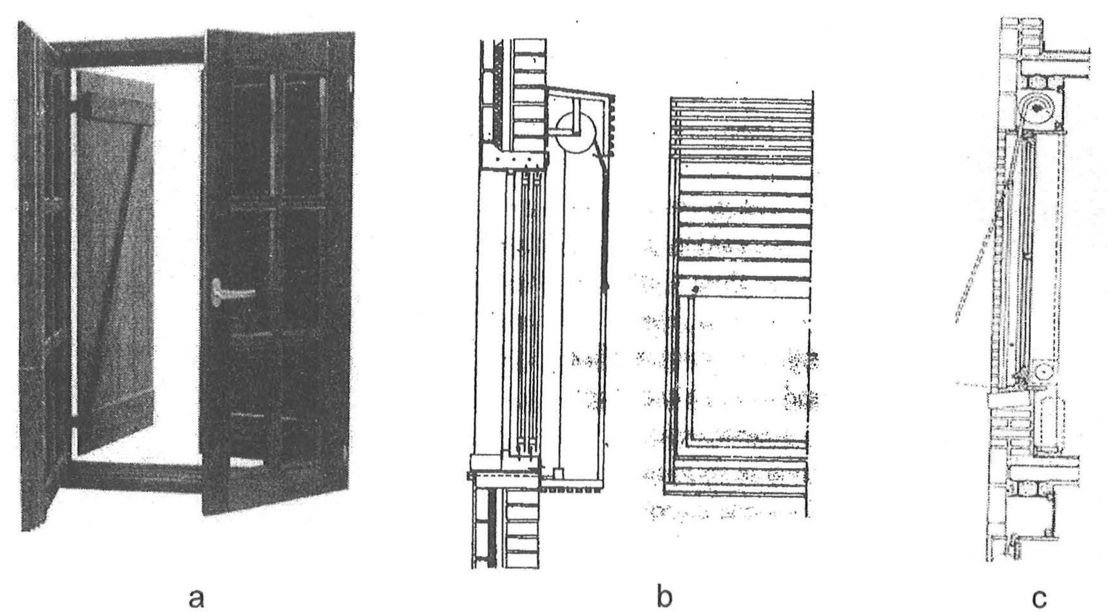
Figura 14. Fachadas con ventanas batientes versus ventanas correderas.

EL CAJÓN DE PERSIANA

Para mejorar el comportamiento térmico y controlar la radiación solar la ventana se ha equipado con diferentes protecciones como por ejemplo las contraventanas y persianas.

La contraventana, tablero fijo con bisagras en la hoja por su cara interior y que cierra con el vidrio, fue un elemento esencial para la protección térmica durante la noche, un oscurecimiento total y disminución de los niveles sonoros en el recinto producidos por el ruido en el exterior.

Una mejora importante en la protección solar de la ventana fue el equiparla con una persiana: con lamas horizontales o verticales, de librillo, enrollable de cuerda, de librillo con lamas orientables, etc. La persiana enrollable de cajón y cinta comenzó a utilizarse a principios del siglo XX y se popularizó inicialmente para solucionar la protección la protección de los grandes miradores en los que el librillo exterior era casi imposible. En los primeros tiempos de utilización, el cajón de persiana se colocaba exterior a la fachada, en la actualidad es habitual colocarle hacia el interior del recinto.



a b c

Figura 15. a) Ejemplo de contraventana. La existencia de cuarterones disminuye el aislamiento a ruido aéreo de la ventana.
b) Bombo exterior en las viviendas de la calle Osio, Barcelona. Arq. J.Martorell, O. Bohigas, D. Mackay.
c) Persiana enrollable de la Casa de las Flores, Arq. Secundino Zuazo, Madrid, 1931-1932.

Las cajas de persiana de obra en las que no se considera el aislamiento acústico a ruido aéreo tienen una influencia desfavorable de aproximadmente 5 dBA en el índice de global de reducción acústica de la fachada de un recinto. Para mejorar el índice de reducción acústica en cajones de persiana de obra instalados, es imprescindible la colocación de bandas de estanquidad, reforzar la estructura de la caja, aumentar la masa de la tapa de registro y realizar un tratamiento absorbente en su interior.

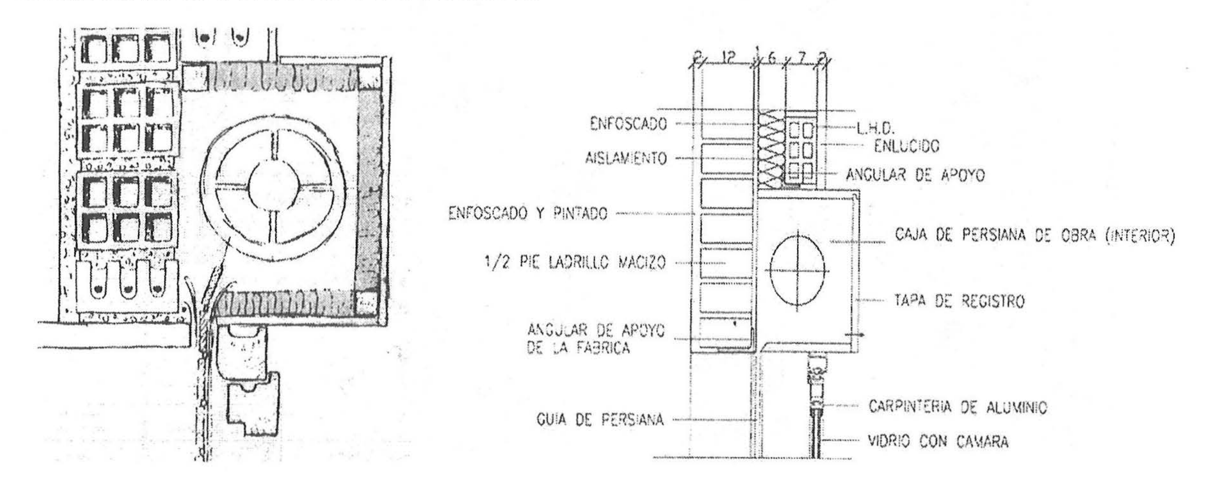


Figura 16. Ejemplos de cajónes de persiana de obra

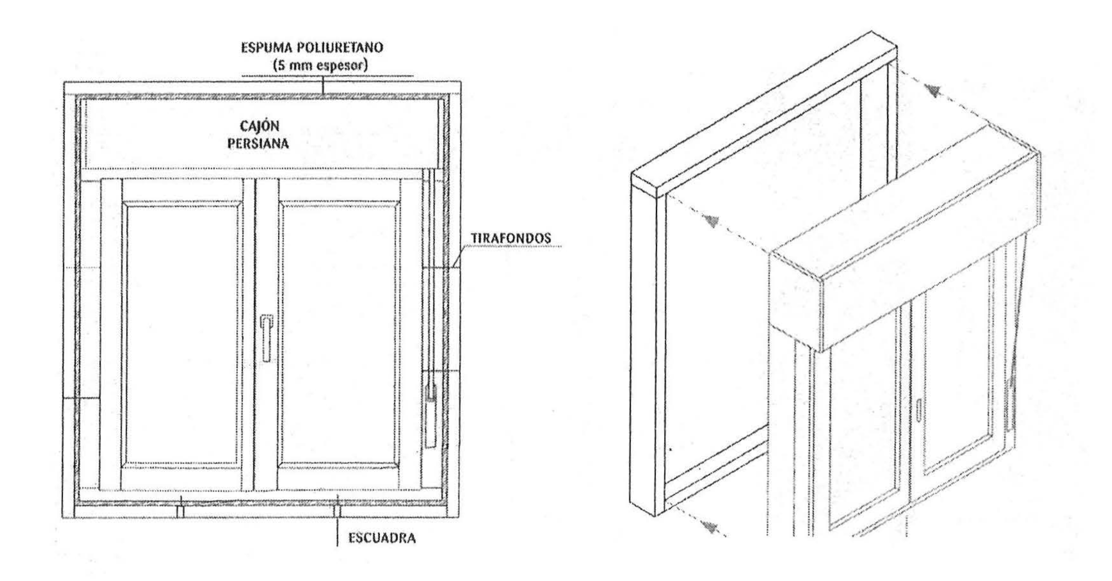


Figura 17. Ejemplo de ventana y cajón de persiana prefabricado en un único conjunto. Puede ir colocada directamente sobre la fábrica o sobre un premarco. El montaje se finaliza con la colocación de tapajuntas.

Existen cajones de persianas prefabricados que tienen excelentes aislamientos térmico y acústico a ruido aéreo. En ellos el cajón de persiana va fijado a la ventana mediante un sistema de clip, que facilita el montaje y la baja permeabilidad al aire del sistema. Otros cajones prefabricados no tienen ningún tratamiento acústico y no están fijados firmemente a la ventana. Ver la figura 18.

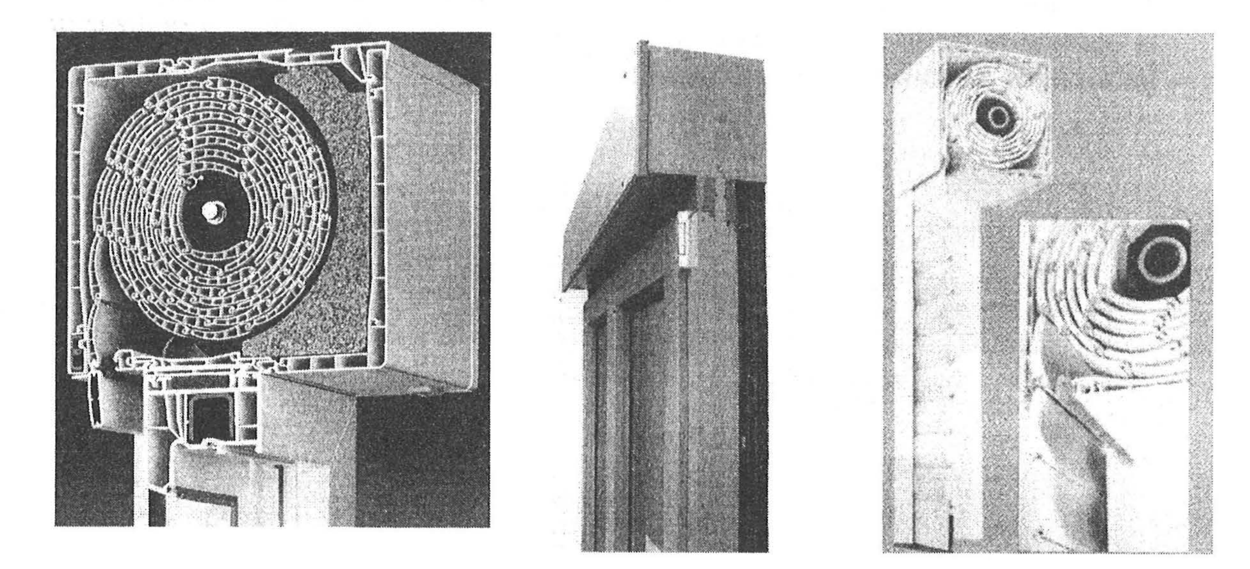


Figura 18. Ejemplos de cajones de persianas prefabricados.

SOBREACRISTALAMIENTOS

En zonas con elevados niveles de ruido en el exterior se pueden utilizar sobreacristalamientos, figura 19. La hoja de ventana está formada por dos hojas que funcionan como una sola, se pueden colocar grandes espesores de cristal y permiten distancias mayores entre los vidrios, 40-50 mm. Es posible la colocación de una veneciana entre los cristales y prescindir del cajón de persiana. Si con el sistema anterior no es suficiente se colocan ventanas dobles.

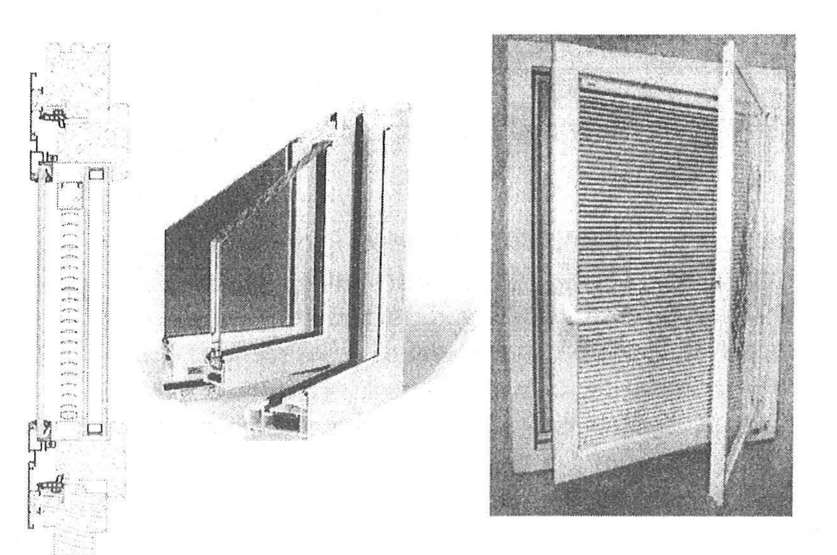
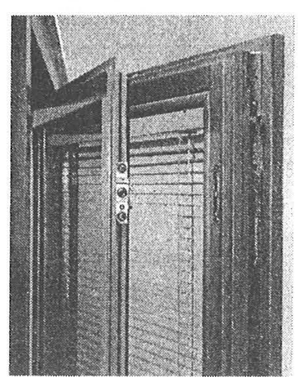



Figura 19. Ejemplos de sobreacristalamientos

VENTANAS DOBLES

En zonas muy ruidosas, como por ejemplo en las proximidades de una autopista, la colocación de ventanas dobles permite que la fachada tenga un aislamiento a ruido aéreo muy elevado. El índice de reducción acústica de las ventanas dobles se determinará mediante ensayo en el laboratorio.

Las dos ventanas deben tener bastidores independientes. El índice de reducción acústica de la ventana doble dependerá del tipo de acristalamiento, calidad de los bastidores, profundidad de la cámara, (a partir de 5 cm son eficaces, pero se recomienda al menos 10 cm). En algunas situaciones será necesario realizar un tratamiento absorbente acústico en las jambas y dintel del hueco entre los dos bastidores, (por ejemplo lana mineral revestida de una placa metálica perforada, con al menos el 15% de perforaciones). El índice de reducción acústica de la ventana doble no aumenta de forma lineal con la anchura de la cámara.

El montaje de las dos ventanas debe realizarse con las mismas precauciones que el caso de las ventanas sencillas, pues sino su eficacia se reduce de forma significativa. Las pequeñas fisuras pueden taparse mediante masillas de larga duración que conserve toda su elasticidad, preferentemente con silicona. Si la anchura de la junta es superior a 5 mm, en primer lugar se aplicará material de

relleno. Este puede ser espuma sintética, celular y comprimible o un perfil de junta.

En las ventanas dobles para evitar reflejos molestos se suele dar una cierta inclinación a la hoja interior hacia el lado del observador, esto no produce ninguna mejora acústica.

Marcos de madera, ventanas de una hoja			
Ventana 1 Espesor vidrio, mm	Cámara, mm	Ventana 2 Espesor vidrio, mm	$R_w + C_{tr}$, dB
10	100	4	47
10	200	8	54

Tabla 7. Ejemplos de índices de reducción acústica de dobles ventanas en laboratorio (CSTB).

En la figura 20 se muestra los resultados medidos in situ de la Diferencia de nivel estandarizada ponderada, $D_{ls,2m,nT,w} + C_{tr}$, en varias docenas de fachadas planas de dormitorios con ventanas dobles. Los recintos son de las mismas características (áreas de la fachada, parte ciega y ventanas), la parte ciega consta del sistema convencional de citara de ladrillo cerámico perforado visto, cámara y tabique, (Datos geométricos promedios de los recintos: Volumen = 30 m^3, $A_{fachada}$ = 10,1 m^2, A_{hueco} = 2 m^2). En la situación original con dos ventanas sencillas sin clasificar de carpintería de aluminio corredera, con cajón de persiana prefabricado sin tratamiento acústico y tapa de registro hacia el interior del dormitorio, los vidrios de las ventanas son sencillos de espesor 4 mm. En esta situación la Diferencia de nivel estandarizada ponderada de la fachada es, $D_{ls,2m,nT,w} + C_{tr}$ = 37 dB. Posteriormente se sustituyó la ventana exterior por otra de aluminio también corredera y con vidrio sencillo de espesor 6 mm. Las mediciones posteriores realizadas muestran que la nueva Diferencia de nivel estandarizada ponderada de la fachada es, $D_{ls,2m,nT,w} + C_{tr}$ = 40 dB

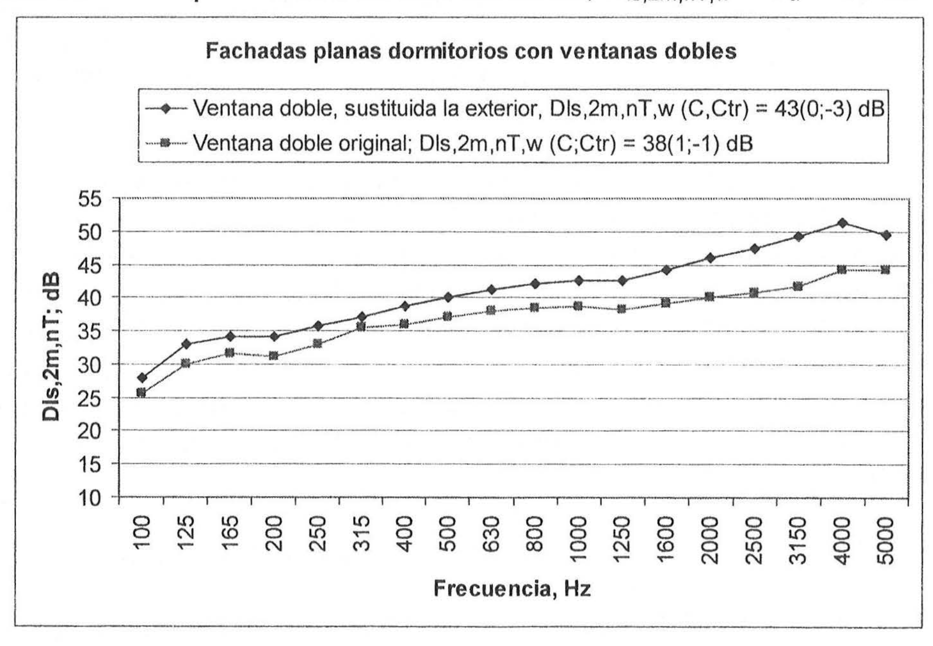


Figura 20. Ejemplo de aislamiento a ruido aéreo de fachadas in situ con ventanas dobles sin clasificar.

ENTRADAS DE AIRE

En algunas zonas muy ruidosas es necesario instalar en los recintos ventanas de Clase 3 o superior y pueden aparecer condensaciones en las superficies interiores de los cerramientos. Por ello será necesario incorporar sistemas de renovación de aire, estudiados acústicamente, de forma que garanticen la adecuada renovación del aire del recinto sin necesidad de abrir la ventana.

Las entradas de aire situadas en la fachada reducen el aislamiento a ruido aéreo de la fachada. En el apartado 3 se mostró que la Diferencia de nivel normalizada de un elemento de construcción pequeño, $D_{n,e,}$ tales como dispositivos de ventilación, cajón de persiana, conductos para cableado eléctrico, etc. se determina en laboratorio según la Norma UNE EN 20140 – 10:1994 de acuerdo con la ecuación

$$D_{n,e} = L_1 - L_2 - 10\lg\frac{A}{A_0} \quad dB \qquad [13]$$

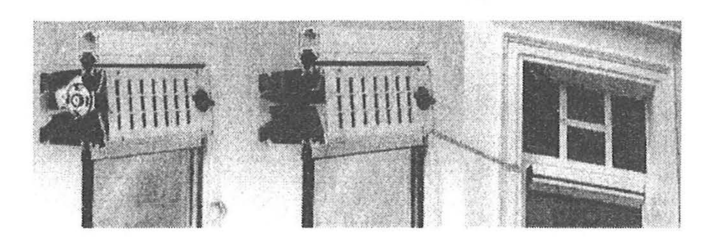
Para tomas de aire o respiraderos sin tratamiento acústico se considera que el índice de reducción acústica es 0 dB.

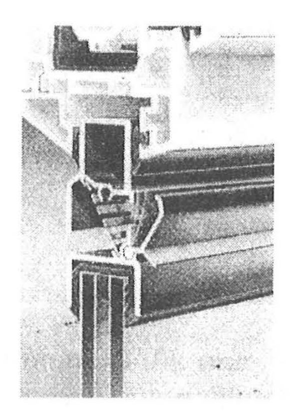
$$D_{n,e} = -10.\lg\left(\frac{S_0}{10}\right) \quad dB \qquad [28]$$

donde S_0 es el área del respiradero, en m^2.

Para aumentar la Diferencia de nivel normalizada de un elemento de construcción pequeño, $D_{n,e}$ es preciso actuar sobre la longitud del recorrido del aire, que el recorrido sea en línea quebrada y colocar revestimientos absorbentes acústicos en el elemento. En el mercado hay diferentes tipos de rejillas de aire homologadas para ventilación natural o forzada.

Los aireadores permiten una aireación dosificada de los locales, sin corrientes de aire, sin necesidad de abrir la ventana. Pueden ser totalmente estancos en la posición de cerrados. Se manipulan mediante una palanca o un botón corredizo. La figura 21 muestra algunos tipos





Área de ventilación	147 - 250 cm^2
Flujo de aire	45 - 81 m^3/h
$D_{n,e,w} + C_{tr}$	35 - 43 dB

Figura 21. Ejemplos de aireadores

La figura 22 muestra una ventana de cubierta preparada para la ventilación natural. Flujo de aire de 30 m^3/h, $D_{n,e,w} + C_{tr} = 38$ dB

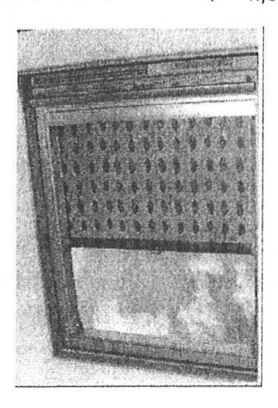


Figura 22. Ventana de cubierta con aireadores

Para la elección de la Diferencia de nivel normalizada $D_{n,e,w} + C_{tr}$ de una entrada de aire en una fachada se puede aplicar el criterio siguiente:

$$D_{n,e,w} > R_{m,w} + 6 \text{ dB}$$

$R_{m,w}$ es el índice ponderado de reducción acústica mixta de la fachada sin entrada de aire. O bien el criterio $D_{n,e,Atr} > R_{m,Atr} + 6$ dB

En las figuras 23 y 24 se muestran los resultados de las mediciones realizadas en laboratorio del índice de reducción acústica de una ventana de PVC de dos hojas, sistema de apertura batiente, y con cajón de persiana aislado acústica y térmicamente. Se comparan los resultados con diferentes tipos de vidrio y con las persiana subida y bajada.

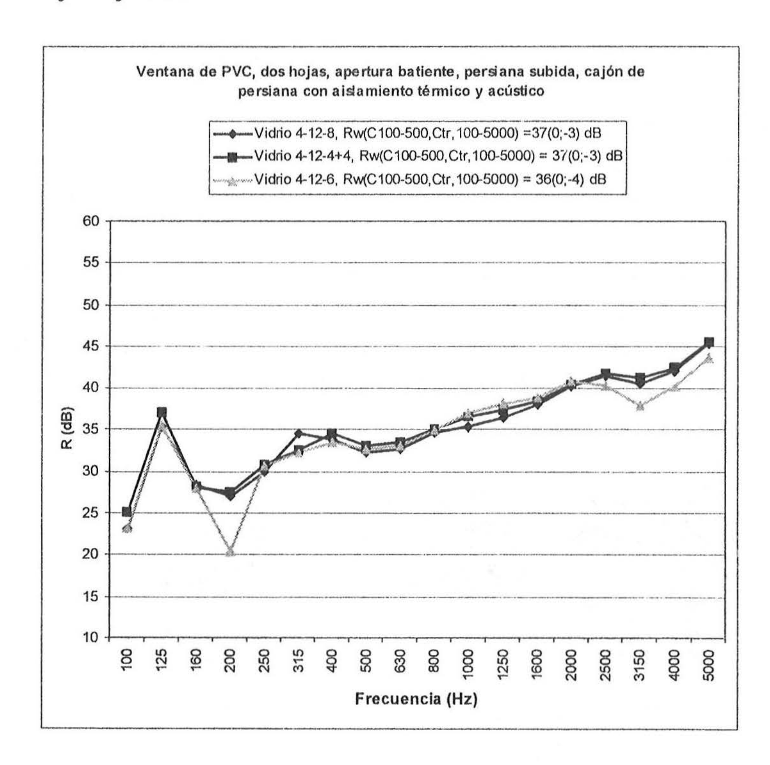


Figura 23. Comparación del índice de reducción acústica a ruido aéreo de una ventana con diferentes tipos de acristalamiento, y la persiana subida.

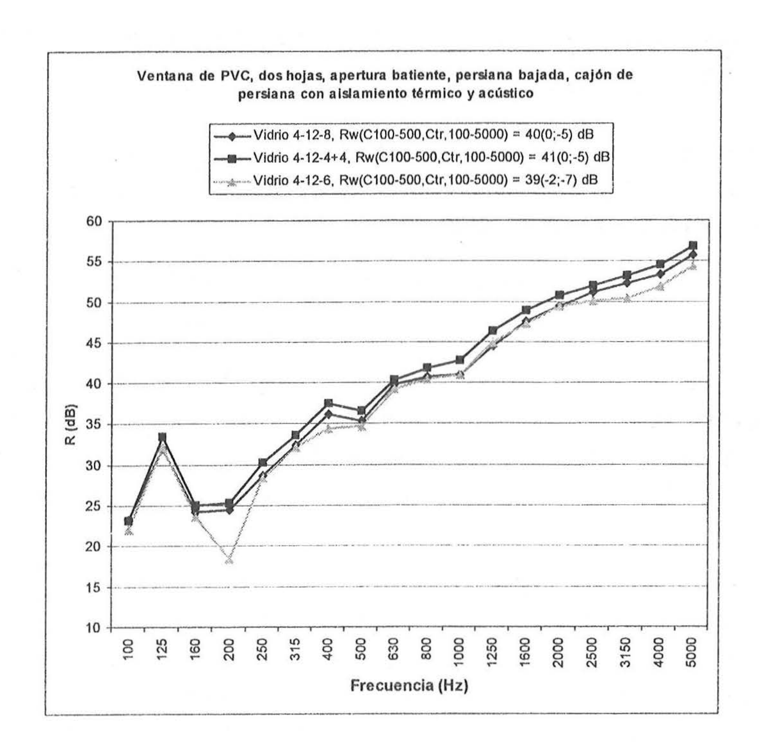


Figura 24. Comparación del índice de reducción acústica a ruido aéreo de una ventana con diferentes tipos de acristalamiento, y la persiana subida.

En la figura 25 se muestran los resultados de las medidas realizadas in situ de la Diferencia de nivel estandarizada ponderada, $D_{ls,2m,nT,w}$ de una fachada ligera de vidrio.

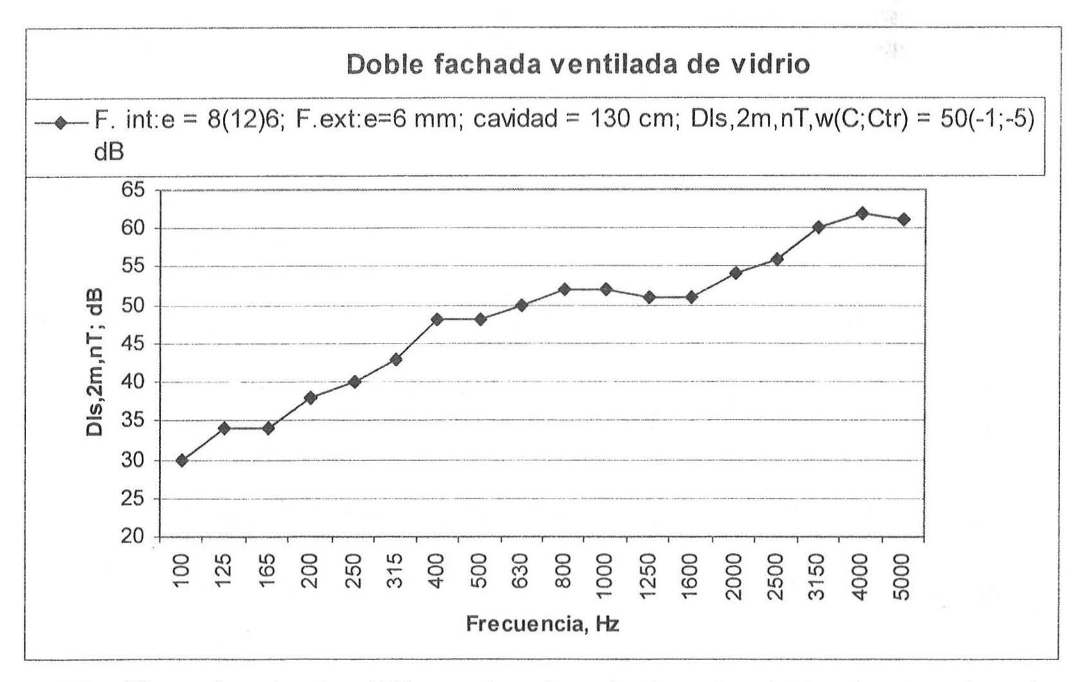


Figura 25. Ejemplo de la Diferencia de nivel estandarizada ponderada, $D_{ls,2m,nT,w}$ de una fachada ligera de vidrio.

Algunas sugerencias de índices de reducción acústica de los componentes de la fachada en un primer análisis.

1- Si $D_{2m,nT,Atr}$ es el aislamiento a ruido aéreo, $D_{2m,nT,Atr}$, en dBA, exigido entre un recinto protegido y el exterior, se puede considerar en adoptar en un primer análisis las siguientes exigencias

$$R_{A,tr,\ ciega} \geq D_{2m,nT,Atr} + 8\ dB(A)$$

$$R_{A,tr\ ventana} \geq D_{2m,nT,Atr} - 2\ dB(A)$$

$$D_{n,e,Atr}\ \text{boca de entrada de aire} \geq D_{2m,nT,Atr} + 3\ dB(A)$$

Estos valores de aislamiento acústico son válidos en las condiciones siguientes: El área de la parte ciega de la fachada ≥ 2 área de la parte acristalada; no hay balcones ni galerías en la fachada del local y el recinto no está en la cubierta.

2- En zonas excesivamente ruidosas, L_d > 74 dB(A)

Se debe instalar una doble ventana de buena carpintería, con vidrios gruesos y distancia mínima entre las ventanas de 140 mm, y absorción acústica en las jambas y el dintel entre las ventanas. Como mucho el 25% de la fachada debe estar acristalada. No se deben colocar cajones de persianas. El índice de reducción acústica de la parte ciega de la fachada $R_{A,tr}$ ≥ 57 dBA. Las entradas de aire deberán estar convenientemente estudiadas, si es posible, reemplazar las bocas de entrada de aire por una ventilación de doble flujo.

EJEMPLO 5

La exigencia de aislamiento a ruido aéreo entre un dormitorio de volumen 40 m^3 y el exterior es $D_{2m,nT,w} + C_{tr}$ = 40 dB. La fachada es plana y está formada por una parte ciega de área 7 m^2 e índice ponderado de reducción acústica $R_w + C_{tr}$ = 47 dB, y un hueco de área 3 m^2 . Hállese el menor valor del índice ponderado de reducción acústica $R_w + C_{tr}$ del cerramiento del hueco que cumple la exigencia.

SOLUCIÓN

Al ser la fachada plana, la diferencia de nivel por la forma de la fachada es ΔL_{fs} =0.

$$D_{2m,nT,w} + C_{tr} = R'_{m,w} + C_{tr} + 10\lg\frac{V}{S} - 5 \qquad dB$$

$$40 \quad dB = R'_{m,w} + C_{tr} + 10\lg\frac{40}{10} - 5 \qquad dB$$ **; $R'_{m.w} + C_{tr}$ = 39 dB**

Si se estima que las pérdidas de aislamiento por transmisiones por flancos es de 2 dB. Se tiene que conseguir que el índice de reducción acústica mínimo de la fachada debe ser $R_{m.w} + C_{tr}$ = 41 dB

Sea $R_c = R_{c,w} + C_{tr}$ = 47 dB y $R_h = R_{h,w} + C_{tr}$ la cantidad a obtener.

De la ecuación [18] se puede obtener: $10^{-0,1R_h} = \dfrac{S.10^{-0,1R_m} - S_c.10^{-0,1R_c}}{S_h}$

$$10^{-0,1R_h} = \frac{10.10^{-4,1} - 7.10^{-4,7_c}}{3};$$ $R_h = R_{h,w} + C_{tr}$ = 36,6 dB ≈ 37 dB

El cerramiento del hueco se tendra que realizar mediante ventanas dobles, o bien ventanas de Clase 3 y acristalamientos de altas prestaciones acústicas, o sobreacristalamientos.

ANEXO A: INDICES GLOBALES DE VALORACIÓN DEL AISLAMIENTO ACÚSTICO A RUIDO AÉREO.

A.1- MAGNITUDES GLOBALES DE LAS PROPIEDADES DE AISLAMIENTO A RUIDO AÉREO DE ELEMENTOS DE CONSTRUCCIÓN Y EN EDIFICIOS, SEGÚN LA UNE-EN ISO 717-1. EVALUACIÓN DEL AISLAMIENTO ACÚSTICO EN LOS EDIFICIOS Y DE LOS ELEMENTOS DE CONSTRUCCIÓN. PARTE 1: AISLAMIENTO AL RUIDO AÉREO.

Es el método más difundido, se basa en la comparación de una curva de aislamiento obtenida con curva tipo, siguiendo un determinado procedimiento. Mediante este se consigue que la dependencia frecuencial del aislamiento a ruido aéreo se transforma en un único número. Los métodos de medición del aislamiento al ruido aéreo de elementos de construcción y en edificios han sido normalizados en las Normas Internacionales ISO 140 partes 3,4,5,9 y 10. La ISO 717 tiene por objetivo normalizar un método por el cual la dependencia en función de la frecuencia del aislamiento a ruido aéreo pueda convertirse en un solo número que caracterice el aislamiento acústico y simplificar la formulación de los requisitos acústicos en los códigos de la edificación.

Para la aplicación de la ISO 717, se utilizan diferentes definiciones como las siguientes:

- **Magnitud global para la valoración del aislamiento al ruido aéreo**: Es el valor en dB, a 500 Hz de la curva de referencia una vez ajustada a los valores experimentales según el método especificado en esta parte de la ISO 717. Existen magnitudes globales de las propiedades globales de aislamiento al ruido aéreo de elementos de construcción, como por ejemplo el índice ponderado de reducción acústica R_w y magnitudes globales del aislamiento al ruido aéreo en edificios tales como: índice ponderado de reducción acústica aparente R'_w, Diferencia de nivel normalizada ponderada $D_{n,w}$, Diferencia de nivel estandarizada ponderada $D_{nT,w}$.

- **Término de adaptación al espectro**: Es el valor, en dB, que ha de añadirse al valor de la magnitud global para tener en cuenta las características de un espectro de ruido particular.

Por ejemplo, es habitual utilizar para caracterizar el comportamiento acústico de un elemento constructivo en laboratorio el índice global R_w (C; C_{tr}), donde

- R_w es el índice ponderado de reducción acústica, en dB.
- C, Término de corrección para ruido rosa ponderado A. Se utiliza en el caso de fuentes de ruido con pocas bajas frecuencias, por ejemplo: actividades humanas (conversación, música, radio, televisión, juegos de niños), trenes a velocidades medias y altas, autopistas a velocidades mayores de 80 km/h, aviones a reacción a distancias cortas, factorías que emiten ruido de frecuencias medias y altas.
- C_{tr}, Termino de corrección para ruido de tráfico urbano ponderado A, se utiliza en el caso de fuentes de ruido con predominio de bajas frecuencias, por ejemplo: Tráfico urbano, trenes a velocidades bajas, aviones a propulsión,

aviones a reacción a grandes distancias, música de discotecas, factorías que emiten ruido en frecuencias bajas y medias.

El procedimiento para la evaluación de magnitudes globales es el mismo para todas ellas y lo utilizaremos por ejemplo en el caso de la Diferencia de nivel estandarizada ponderada $D_{nT,w}$ en dB

- Diferencia de nivel estandarizada ponderada $D_{nT,w}$.

Para valorar los resultados conforme a las Normas ISO 140 en bandas de un tercio de octava o de octava, con precisión de 0,1 dB, se desplaza la curva de referencia, Tabla A1, en saltos de 1 dB hacia la curva medida hasta que la suma de las desviaciones desfavorables sea lo mayor posible pero no mayor de 32,0 dB, para mediciones en 16 bandas de tercio de octava, o 10,0 dB, para mediciones en 5 bandas de octava. Se produce una desviación desfavorable en una determinada banda de frecuencia cuando el resultado de las mediciones es inferior al valor de referencia. Únicamente se consideran las desviaciones desfavorables.

El valor, en dB, de la curva de referencia en la banda de 500 Hz, después del desplazamiento, de acuerdo con el procedimiento anterior es el valor de $D_{nT,w}$.
El rango de frecuencias de la curva de referencia y de la de medición está entre 100 y 3150 Hz en bandas de tercio de octava y de 125 a 2000 Hz para bandas de octava. El rango de frecuencias puede ampliarse entre 50 y 5000 Hz.

Frecuencia, Hz	Valores de referencia, dB	
	Bandas de tercio de octava	Bandas de octava
100	33	
125	36	36
160	39	
200	42	
250	45	45
315	48	
400	51	
500	52	52
630	53	
800	54	
1000	55	55
1250	56	
1600	56	
2000	56	56
2500	56	
3150	56	

Tabla A1: Valores de referencia para aislamientos a ruido aéreo:

En la figura A1 se representan los valores de la curva de referencia usados para comparar con los resultados de la medición, para aislamiento al ruido aéreo, en bandas de tercio de octava.

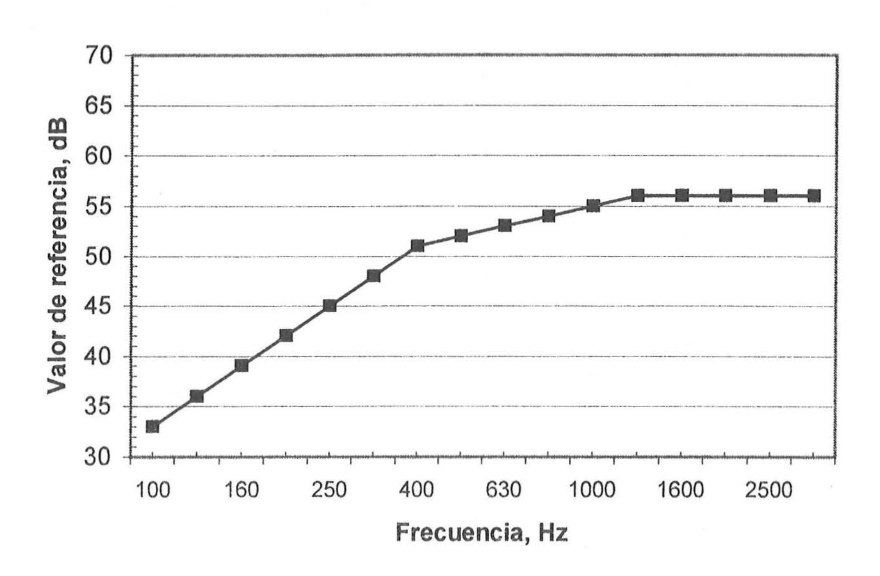


Figura A1: Valores de la curva de referencia en tercios de octava.

- Cálculo de los términos de adaptación espectral de 100 Hz a 5000 Hz

Los términos de adaptación espectral, C_j, deben calcularse con los espectros sonoros dados en la Tabla A1, mediante la ecuación:

$$C_j = X_{Aj} - X_w \text{ dB} \qquad \text{[A-1]}$$

donde

j, es el índice de los espectros sonoros C, C_{tr}

X_w , es el valor del índice global calculado a partir de R, R', D_n, D_{nT}

X_{Aj} se calcula a partir de la expresión

$$X_{Aji} = -10 \log \sum 10^{0,1(L_{ij} - X_i)} \quad dB \qquad \text{[A-2]}$$

donde

i es el índice para las bandas de tercio de octava, o para las bandas de octava.

L_{ij} son los niveles a la frecuencia i para el espectro j

X_i es R_i , o R'_i , o $D_{n,i}$, o $D_{nT,i}$, a la frecuencia de medida i dada con la precisión de 0,1 dB.

Se calcula el término de adaptación espectral con precisión de 0,1 dB y se redondea al número entero más próximo.

Frecuencia, Hz	Niveles sonoros L_{ij}, dB			
	Espectro para calcular $C_{100-5000}$		Espectro para calcular $C_{tr,100-5000}$	
	Tercio de octava	Octava	Tercio de octava	Octava
100	-30		-20	
125	-27	-22	-20	-14
160	-24		-18	
200	-22		-16	
250	-20	-15	-15	-10
315	-18		-14	
400	-16		-13	
500	-14	-9	-12	-7
630	-13		-11	
800	-12		-9	
1000	-11	-6	-8	-4
1250	-10		-9	
1600	-10		-10	
2000	-10	-5	-11	-6
2500	-10		-13	
3150	-10		-15	
4000	-10	-5	-16	-11
5000	-10		-18	

Nota: Todos los niveles están ponderados A y el nivel global del espectro está normalizado a 0 dB.

Tabla A2: Espectros de nivel sonoro para calcular los términos de adaptación del espectro.

Para las mediciones in situ de acuerdo con las Normas ISO 140-4 o 5, se debe indicar si los resultados globales se expresan en octavas o tercios de octava. Es habitual encontrar diferencias de ± 1 dB.

A2.- **Índices globales ponderados A, según el DB HR Protección frente al ruido**

Según la terminología de este documento se definen:

- **Aislamiento acústico a ruido aéreo**: Diferencia de niveles estandarizada, ponderada A, en dBA, entre el recinto emisor y el receptor.
- Para recintos interiores se utiliza el índice $D_{nT,A}$.
- Para recintos en los que alguno de sus cerramientos constituye una *fachada* o una *cubierta* en las que el *ruido exterior dominante* es el de automóviles o el de aeronaves, se utiliza el índice $D_{2m,nT,Atr}$.
- Para recintos en los que alguno de sus cerramientos constituye una *fachada* o una *cubierta* en las que el *ruido exterior dominante* es el de tráfico ferroviario o el de estaciones ferroviarias, se utiliza el índice $D_{2m,nT,A}$.

Diferencia de niveles estandarizada, ponderada A, en fachadas, en cubiertas y en suelos en contacto con el aire exterior para ruido de automóviles, $D_{2m,nT,Atr}$: Valoración global, en dBA, de la diferencia de niveles estandarizada de una fachada, de una cubierta o un suelo en contacto con el aire exterior, $D_{2m,nT}$, para un ruido exterior de automóviles.
Se define mediante la expresión:

$$D_{2m,nT,Atr} = -10.\lg\sum_{i=1}^{n} 10^{(L_{Atr,i} - D_{2m,nT,i})/10} \quad [dBA]$$

$D_{2m,nT,i}$ la diferencia de niveles estandarizada, en la banda de frecuencia i, [dB];
$L_{Atr,i}$ el valor del espectro normalizado del ruido de automóviles, ponderado A, en la banda de frecuencia i, en dBA; i recorre todas las bandas de frecuencia de tercio de octava de 100 Hz a 5kHz. En caso de ruido predominante de aeronaves también se utilizará este índice para la valoración global, pero usando los valores del espectro normalizado de ruido de aeronaves, ponderado A.

Diferencia de niveles estandarizada, ponderada A, entre recintos interiores, $D_{nT,A}$: Valoración global, en dBA, de la diferencia de niveles estandarizada, entre recintos interiores, D_{nT}, para ruido rosa.
Se define mediante la expresión:

$$D_{nT,A} = -10.\lg\sum_{i=1}^{n} 10^{(L_{Ar,i} - D_{nT,i})/10} \quad [dBA]$$

$D_{nT,i}$ la diferencia de niveles estandarizada, en la banda de frecuencia i, [dB];
$L_{Ar,i}$ el valor del espectro normalizado del ruido rosa, ponderado A, en la banda de frecuencia i, en dBA; i recorre todas las bandas de frecuencia de tercio de octava de 100 Hz a 5kHz.

Espectro normalizado de ruido de automóviles, ponderado A, $L_{Atr,i}$
Representación, en forma numérica, de los valores de presión sonora, ponderados A, correspondientes a ruido de automóviles en las frecuencias en bandas de tercios de octava y de octavas.

Frecuencia central f_i, Hz	1/1 Octava $L_{Atr,i}$, dBA	1/3 Octava $L_{Atr,i}$, dBA
100		-20
125	-15,7	-20
160		-18
200		-16
250	-10,7	-15
315		-14
400		-13
500	-7,7	-12
630		-11
800		-9
1.000	-3,7	-8
1.250		-9
1.600		-10
2.000	-6,7	-11
2.500		-13
3.150		-15
4.000	-11,7	-16
5.000		-18

Espectro normalizado de ruido rosa, ponderado A, $L_{Ar,i}$

Representación, en forma numérica, de los valores de presión sonora, ponderados A, correspondientes a ruido rosa normalizado en las frecuencias en bandas de tercios de octava y de octavas.

Frecuencia central f_i, Hz	1/1 Octava $L_{Ar,i}$, dBA	1/3 Octava $L_{Ar,i}$, dBA
100		-30,1
125	-22,4	-27,1
160		-24,4
200		-21,9
250	-14,9	-19,6
315		-17,6
400		-15,8
500	-9,5	-14,2
630		-12,9
800		-11,8
1.000	-6,3	-11
1.250		-10,4
1.600		-10
2.000	-5,1	-9,8
2.500		-9,7
3.150		-9,8
4.000	-5,3	-10
5.000		-10,5

EJEMPLO 6
Los resultados promedios de las mediciones acústicas realizadas, según la UNE-EN ISO 140-5, del aislamiento acústico a ruido aéreo de la fachada de un dormitorio, son los siguientes

Frecuencia, Hz	$L_{1,2m}$, dB	L_2, dB	T_2, s
100	72,4	50,7	0,70
125	79,1	56,9	1,08
160	75,5	54,1	1,09
200	70,0	54,0	1,44
250	73,8	51,3	1,22
315	71,1	44,0	1,17
400	73,3	41,3	0,99
500	81,0	50,7	1,05
630	84,4	55,8	1,24
800	78,5	48,1	1,35
1000	75,3	41,2	1,34
1250	73,4	43,0	1,26
1600	75,9	37,8	1,15
2000	78,1	38,8	1,03
2500	78,5	35,1	0,98
3150	70,5	30,7	1,02
4000	65,0	27,2	1,03
5000	58,9	27,4	0,94

Datos geométricos del recinto: volumen 29,4 m^3, área de la fachada 5,1 m^2, área del hueco 2,8 m^2, su cerramiento es una ventana de dos hojas de apertura batiente, carpintería de PVC, cajón de persiana prefabricado y vidrios 8(10)6. No se han incluido los valores del ruido de fondo en el recinto receptor al ser mucho menores que los valores del nivel sonoro en el recinto receptor L_2. Calcúlense: a) la diferencia de niveles estandarizada ponderada $D_{ls,2m,nT,w}+C_{tr,100\text{-}5000}$ de la fachada del recinto según la UNE-EN ISO 717-1; b) la diferencia de niveles estandarizada, ponderada A, frente al ruido de tráfico de la fachada $D_{2m,nT,Atr}$ según el DB-HR Protección frente al ruido del CTE.

SOLUCIÓN

a) la diferencia de niveles estandarizada ponderada $D_{ls,2m,nT,w}+C_{tr,100\text{-}5000}$ de la fachada del recinto según la UNE-EN ISO 717-1

Al sustituir los valores medidos en la expresión de la definición de la diferencia de niveles estandarizada $D_{ls,2m,nT} = L_{1,2m} - L_2 + 10\lg\frac{T}{T_0}$ dB; se obtiene

Frecuencia, Hz	$D_{ls,2m,nT}$, dB
100	23,1
125	25,5
160	24,8
200	20,6
250	26,4
315	30,8
400	35,0
500	33,5
630	32,5

800	34,7
1000	38,4
1250	34,4
1600	41,7
2000	42,4
2500	46,3
3150	42,9
4000	40,9
5000	34,2

Cálculo de la magnitud global y de los términos de adaptación espectral

(**d**) Desplazamiento de la curva de referencia:-16 dB								
Frec , Hz	**(a)** C.R dB	**(b)** $D_{ls,2m,nT}$, dB	**a+d-b** dB	Desv. Desf. dB	Espectro 1 para C L_{i1}, dB	L_{i1}– **b** dB	Espectro 2 para C_{tr} L_{i2}, dB	L_{i2}– **b** dB
100	33	23,1	-6,1	-	-30	-53,1	-20	-43,1
125	36	25,5	-5,5	-	-27	-52,5	-20	-45,5
160	39	24,8	-1,8	-	-24	-48,8	-18	-42,8
200	42	20,6	5,4	5,4	-22	-42,6	-16	-36,6
250	45	26,4	2,6	2,6	-20	-46,4	-15	-41,4
315	48	30,8	1,2	1,2	-18	-48,8	-14	-44,8
400	51	35,0	0	0	-16	-51	-13	-48
500	52	33,5	2,5	2,5	-14	-47,5	-12	-45,5
630	53	32,5	4,5	4,5	-13	-45,5	-11	-43,5
800	54	34,7	3,3	3,3	-12	-46,7	-9	-43,7
1000	55	38,4	0,6	0,6	-11	-49,4	-8	-46,4
1250	56	34,4	5,6	5,6	-10	-44,4	-9	-43,4
1600	56	41,7	-1,7	-	-10	-51,7	-10	-51,7
2000	56	42,4	-2,4	-	-10	-52,4	-11	-53,4
2500	56	46,3	-6,3	-	-10	-56,3	-13	-59,3
3150	56	42,9	-2,9	-	-10	-52,9	-15	-57,9
4000	-	40,9			-10	-50,9	-16	-56,9
5000	-	34,2			-10	-44,2	-18	-52,2
		S. D. D = 25,7 < 32 dB $D_{ls,2m,nT,w}$ = 52-16 = 36 dB			$X_{A1} = -10.\lg(\sum 10^{0,1(L_{ij}-b_i)})\ dB$ X_A = 35,2 $C_{100\text{-}5000}$ = 35 –36 $C_{100\text{-}5000}$ =-1 dB		$X_{A2} = -10.\lg(\sum 10^{0,1(L_{i2}-b_i)})\ dB$ X_{A2} = 31,7 $C_{tr(100\text{-}5000)}$ = 32 –36 $C_{tr(100\text{-}5000)}$ = -4 dB	
$D_{ls,2m,nT,w}(C_{100\text{-}5000};C_{tr,100,5000})$ = 36(-1; - 4) dB								

Nota: En la cuarta columna se han calculado las desviaciones, para ello en cada fila de ésta columna, a la curva de referencia **a** se le sumó el desplazamiento **d** y se le restó el valor $D_{ls,2m,nT}$; **b**. En la quinta columna se han escrito las desviaciones desfavorables, que se han sumado en la parte inferior.

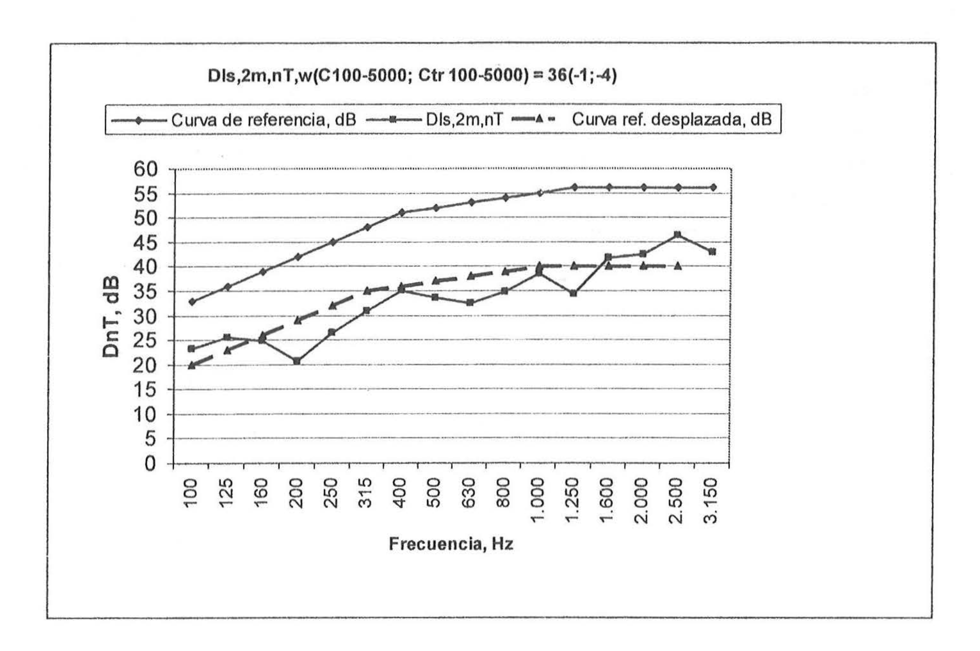


Figura: Gráfica de la curva de referencia, curva de referencia desplazada y resultados de $D_{ls,2m,nT}$.

b) la diferencia de niveles estandarizada, ponderada A, frente al ruido de tráfico de la fachada $D_{2m,nT,Atr}$ según el DB-HR Protección frente al ruido del CTE.

$$D_{2m,nT,Atr} = -10.\lg \sum_{i=1}^{n} 10^{0,1(L_{Atr,i} - D_{2m,nT,i})} \quad [dBA]$$

Frecuencia central f_i, Hz	$D_{2m,nT}$ dB	Espectro normalizado del ruido de automóviles, ponderado A $L_{Atr,i}$, dBA
100	23,1	-20
125	25,5	-20
160	24,8	-18
200	20,6	-16
250	26,4	-15
315	30,8	-14
400	35,0	-13
500	33,5	-12
630	32,5	-11
800	34,7	-9
1.000	38,4	-8
1.250	34,4	-9
1.600	41,7	-10
2.000	42,4	-11
2.500	46,3	-13
3.150	42,9	-15
4.000	40,9	-16
5.000	34,2	-18

$$D_{2m,nT,Atr} = -10.\lg \sum_{i=1}^{n} 100^{0,1(L_{Atr,i} - D_{2m,nT,i})} \quad [dBA]$$

$D_{2m,nT,Atr}$ = 31,7 dBA

EJEMPLO 7

Los resultados promedios de las mediciones acústicas realizadas, según la UNE-EN ISO 140-4, del aislamiento acústico a ruido aéreo entre dos salones, son los siguientes

Frecuencia, Hz	L_1, dB	L_2, dB	T_2, s
100	90,5	50,2	0,90
125	89,5	47,0	1,81
160	91,6	50,0	1,46
200	96,0	46,5	1,63
250	98,0	44,0	1,45
315	99,2	44,8	1,19
400	99,3	43,4	0,93
500	101,5	45,6	1,29
630	101,8	46,6	1,56
800	101,9	50,8	1,75
1000	101,7	48,8	1,76
1250	99,4	43,4	1,70
1600	99,3	50,3	1,63
2000	99,7	46,5	1,42
2500	100,4	43,5	1,39
3150	98,6	40,0	1,46
4000	96,5	35,0	1,46
5000	93,8	28,7	1,37

Los volúmenes de los recintos emisor y receptor son 57 y 58 m^3 respectivamente. El área de la pared separadora es de 17 m^2. No se han incluido los valores del ruido de fondo en el recinto receptor al ser mucho menores que los valores del nivel sonoro en el recinto receptor L_2.
Calcúlense: a) la diferencia de niveles estandarizada ponderada $D_{nT,w}$+ $C_{100\text{-}5000}$ entre los recintos según la UNE-EN ISO 717-1; b) la diferencia de niveles estandarizada, ponderada A entre recintos interiores D_{nTA} según el DB-HR Protección frente al ruido del CTE.

SOLUCIÓN:

a) - $D_{ls,2m,nT,w}(C_{100\text{-}5000};C_{tr\ 100,5000})$ = 59(0; -3) dB ;
b) - Al utilizar el espectro normalizado de ruido rosa, ponderado A, $L_{Ar,i}$ se obtiene: $D_{nT,A}$ = 58,5 dBA

BIBLIOGRAFÍA

[1] Paricio, I. La fachada de ladrillo. Ed. Bisagra, Barcelona, 2000.

[2] Frida Bazzocchi; Facciate Ventilate, Alinea Editrice, Firenze 2002.

[3] UNE-EN ISO 140-3:-Acústica. Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 3: Medición en laboratorio del aislamiento acústico a ruido aéreo de los elementos de construcción.

[4] UNE EN ISO 354:2004 Acústica. Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante (ISO 354:2003).

[5] UNE-EN ISO 140-4:- Acústica. Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 4: Medición *in situ* del aislamiento a ruido aéreo entre locales.

[6] UNE-EN ISO 140-5: Acústica. Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte5: Mediciónes in situ del aislamiento acústico a ruido aéreo de elementos de fachada y de fachadas

[7] UNE-EN ISO 140-10: Acústica. Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 10: Medición en laboratorio del aislamiento a ruido aéreo de los elementos de construcción pequeños.

[8] UNE-EN ISO 11654:1998: Acústica. Absorbentes acústicos para su utilización en edificios. Evaluación de la absorción acústica. (ISO 11654:1997).

[9] UNE-EN 12354-1:2000. Acústica en la edificación. Estimación de las características acústicas de las edificaciones a partir de las características de sus elementos. Parte 1: Aislamiento acústico del ruido aéreo entre recintos.

[10] UNE –EN 12354-3. (Enero 2001). ACÚSTICA DE LA EDIFICACIÓN
Estimación de las características acústicas de las edificaciones a partir de las características de sus elementos. Parte 3: Aislamiento acústico a ruido aéreo contra ruido del exterior.

[11] UNE-EN ISO 717-1: 1996. Acústica. Evaluación del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción. Parte 1: Aislamiento a ruido aéreo.

[12] BERANEK, L., Noise and Vibration Control Engineering. Principles and Applications, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1992.

[13] CREMER;MÜLLER. Principles and Applications of Room Acoustics. Vol. I, II, Applied Science Publishers. London, 1982.

[14] FAHY,F. Sound and Structural Vibration, Academic Press, London, 1994

[15] FAHY, F., Foundations of Engineering Acoustics. Academic Press, San Diego, 2001.

[16] HARRIS, C., Acoustical Measurements and Noise Control, Mc Graw Hill, New York, 1991. Existe una versión en español.

[17] Beckett, H.E.; Godfrey J.A (1978). Ventanas. Función, diseño e instalación. Ed Gustavo Gili S.A. Barcelona.

[18] UNE-EN 12207, abril 2000. Puertas y ventanas. Permeabilidad al aire. Clasificación.

[19] prEN 14351-1. Windows and pedestrian doorsets- Product standart, performance characteristics- Part 1: Windows and external pedestrian doorsets without resistance to fire and smoke leakage characteristics but including external fire performance for roof windows. (Final Draft September 2005).

[20] Manual de producto, Ventanas (2005). ASEFAVE, Ediciones AENOR.

NOTAS

CUADERNO

233.01

cuadernos.ijh@gmail.com
info@mairea-libros.com


ISBN 978-84-9728-232-1

9 788497 282321